

TEKNILLINEN KORKEAKOULU
Elektroniikan, tietoliikenteen ja automaation tiedekunta
Signaalinkäsittelyn ja akustiikan laitos

Teemu Reuna

Kivi kaiutinkotelomateriaalina

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoo, 25. helmikuuta, 2008

Valvoja ja ohjaaja :

Professori Matti Karjalainen

Tekijä:	Teemu Reuna	
Työn nimi:	Kivi kaiutinkotelomateriaalina	
Päivämäärä:	25.2.2008	Sivuja: 76
Tiedekunta:	Elektroniikka, tietoliikenne ja automaatio	
Professuuri:	S-89 Akustiikka ja äänenkäsittelytekniikka	
Työn valvoja ja ohjaaja:	Professori Matti Karjalainen	
<p>Diplomityössä tutkitaan kotelomateriaalin vaikutusta kaiuttimen kykyyn toistaa ääntä. Tarkoituksena on selvittää, miten kivimateriaali soveltuu kotelomateriaaliksi. Tutkimusta varten hankittiin mallikaiutin, jonka pohjalta tehtiin prototyyppikotelo kivistä. Prototyypin materiaaliksi valittiin yksi kolmesta tutkittavasta kivilajista. Tätä valintaa varten kiville tehtiin moodianalyysi, jossa apuna käytettiin Pronyn menetelmää. Kivilevyjen moodikäyttäytymistä tarkasteltiin mittaamalla niiden kiihtyvyysvasteet ja analysoimalla näitä vasteita.</p> <p>Tutkimuksessa käytiin läpi myös kaiuttimen teoriaa, etenkin kaiutinkoteloon liittyvää teoriaa. Kokonaiskuvaa kaiuttimen toiminnasta tarkastellaan akustisen virtapiirianalogian avulla.</p> <p>Prototyypin materiaalia valittaessa ei moodianalyysistä juurikaan ollut apua, sillä kivilevyjen tulokset olivat hyvin samankaltaisia. Päätös materiaalista tehtiinkin tiheyden perusteella. Prototyypin ja mallikaiuttimen vertailu tehtiin vertailemalla kaiuttimien taajuus- ja tehovasteita sekä vertailemalla koteloiden kiihtyvyysvasteita. Suurta eroa kaiuttimien vasteissa ei ollut. Merkittävimmät poikkeamat syntyivät prototyyppikotelon etulevystä, jonka muoto poikkesi hieman mallikaiuttimen muodosta.</p> <p>Kaiutinkotelomateriaalina kivi on kuitenkin hyvä. Tosin kustannussyistä johtuen sitä kannattaa käyttää lähinnä vain arvokkaammissa kaiuttimissa, joissa kotelon hinta on järkevässä suhteessa muihin komponentteihin.</p>		
Avainsanat: Kaiutinkotelomateriaali, moodianalyysi, Pronyn menetelmä, taajuusvaste, diffraktio, tukiraketeet, vaimennusmateriaali, akustinen virtapiirianalogia		

Author:	Teemu Reuna	
Name of the thesis:	Stone as loudspeaker enclosure material	
Date:	Feb 25, 2008	Number of pages: 76
Faculty:	Electronics, Communications and Automation	
Professorship:	S-89 Acoustics and Audio Signal Processing	
Supervisor and Instructor:	Professor Matti Karjalainen	
<p>This Master’s thesis studies the effect of loudspeaker enclosure material on the sound produced by the loudspeaker. The idea is to find out, if stone materials are usable as loudspeaker enclosure materials. For the study a model loudspeaker is bought. From this model a prototype loudspeaker is built from stone. Three species of stone are studied and the material for the prototype is selected from these. To aid this selection, mode analysis is done on the stone materials. Prony’s method is applied in the analysis. The modal behaviours of the stone materials are studied by measuring their acceleration responses and analyzing these responses.</p> <p>The thesis introduces also loudspeaker theory especially that of the loudspeaker enclosure. The big picture of loudspeaker functionality is clarified with the acoustic circuit theory.</p> <p>The mode analysis was not much of a help when doing the decision on the prototype material, mainly because the measurement results were so similar among the stone materials. The decision was made based on the density of the material. The comparison between the model and the prototype loudspeakers was based on frequency responses and power spectra of the loudspeakers. Also the acceleration responses of the loudspeaker cabinets were compared. No major differences were found on these measurements. The most notable differences were due to the front panel of the prototype that differed in shape from the model’s baffle.</p> <p>Stone is a good loudspeaker enclosure material. Though because its high cost it should be used in relatively expensive loudspeakers. This way the price of the enclosure would be reasonable compared to the other parts of the loudspeaker.</p>		
<p>Keywords: Loudspeaker enclosure material, mode analysis, Prony’s method, frequency response, diffraction, bracing, damping material, acoustic circuit theory</p>		

Alkusanat

Tämä diplomityö tehtiin Teknillisen korkeakoulun Signaalinkäsittelyn ja akustiikan laitoksessa. Työn tilaajana toimi Palin Granit Oy. Diplomityön ohjaajana ja valvojana toimi professori Matti Karjalainen.

Matti Karjalaiselle suuret kiitokset diplomityöhön liittyneistä neuvoista, ohjeista ja korjauksista. Kiitokset myös muulle Akustiikan laboratorion väelle, joka oli aina valmis auttamaan hädän hetkellä.

Kiitän myös Palin Granit Oy:tä, joka mahdollisti tämän mielenkiintoisen diplomityön tekemisen.

Kiitokset vanhemmilleni tuestanne kaikkina näinä vuosina.

Otaniemi, Helmikuu 25, 2008

Teemu Reuna

Sisältö

Käytetyt lyhenteet ja muuttujat	x
Lista kuvista	xii
Lista taulukoista	xiii
1 Johdanto	1
2 Yleistä teoriaa kaiuttimista	2
2.1 Kaiuttimen rakenne	2
2.2 Dynaaminen kaiutinelementti	2
2.3 Malliesimerkki dynaamisesta kaiutinelementistä	4
2.4 Jakosuodin	5
2.5 Kaiutinkotelo	7
2.5.1 Kotelon muoto ja diffraktio	8
2.5.2 Suljettu kotelo	10
2.5.3 Refleksikotelo	11
2.5.4 Kotelomateriaalin vaikutus ääneen	12
2.5.5 Tukirakenteet ja vaimennusmateriaalit	15
2.6 Akustisen järjestelmän sijaiskytkennät	17
2.6.1 Sähköisten osien määritelmät	19
2.6.2 Mekaanisten osien impedanssi	20
2.6.3 Kartion säteilyimpedanssi	20

2.6.4	Kaiutinkotelon sisällä olevan ilman impedanssi	21
2.6.5	Refleksiputken säteilyimpedanssi	22
2.6.6	Refleksiputken impedanssi	23
2.7	Kaiutinten ominaisuudet kuulon kannalta	23
2.7.1	Kuulon toiminta	23
2.7.2	Magnitudivastevirheiden havaitseminen	25
2.7.3	Ryhmäviivevirheiden havaitseminen	25
2.7.4	Särön havaitseminen	26
3	Kaiutinmateriaalien mittaus ja vertailu	27
3.1	Prototyyppikaiuttimen valmistuksesta	27
3.2	Mitattavat kivimateriaalit	28
3.2.1	Aurora	28
3.2.2	Balmoral	28
3.2.3	Varpaisjärven musta	29
3.3	Mittausjärjestelyt	29
3.3.1	Impulssivasara	31
3.3.2	Kiihtyvyyssanturi	32
3.4	Mittaustulokset ja niiden analysointi	32
3.4.1	Pronyn menetelmä	33
3.4.2	Vaimenemisaika	33
3.4.3	Q-arvo	34
3.4.4	Kivilevyjen mittaustulokset	35
3.4.5	Puulevyjen mittaustulokset	36
3.5	Prototyypin materiaalin valinta	36
4	Mallikaiutin	41
4.1	Esittely	41
4.2	Taajuusvaste	42
4.2.1	Mittausjärjestelyt	42

4.2.2	Mittaustulokset	43
4.3	Värähtelymittaukset	44
4.3.1	Mittausjärjestelyt	44
4.3.2	Mittaustulokset	45
5	Prototyyppikaiutin	47
5.1	Esittely	47
5.2	Taajuusvaste	49
5.3	Värähtelymittaukset	50
6	Pohdinta ja johtopäätökset	52
A	Liitteet	58
A.1	Taajuusvasteiden tulostamiseen käytetty Matlab-koodi	58
A.2	Moodien laskentaan käytetty Matlab-koodi	59
A.2.1	Impulssivasteen laskentaan käytetty Matlab-koodi	60
A.2.2	Vaimenemisajan laskentaan käytetty Matlab-koodi	61
A.2.3	Q-arvon laskentaan käytetty Matlab-koodi	61
A.2.4	Minimivaiheisen taajuusvasteen Matlab-koodi	61
A.2.5	Tehovasteen laskentaan ja tulostukseen käytetty Matlab-koodi	61

Käytetyt lyhenteet ja muuttujat

IM	Intermodulation Distortion
MDF	Medium Density Fiberboard
THD	Total Harmonic Distortion
RMS	Root Mean Square
A	putken poikkipinta-ala
A_0	poikkipinta-ala, johon venyttävä voima vaikuttaa
A_f	perustaajuuden tai sen harmonisen amplitudi
a	kaiutinelementin kalvon tehollinen säde
a_1	refleksiputken säde
a_2	refleksiputken tehollinen säde
B	magneettivuon tiheys
B_K	kotelon puristuvuuden korjaustermi
C	kapasitanssi
C_A	joustavuus, akustinen kapasitanssi
C_{AB}	kaiutinkotelon joustavuus
C_{AS}	kaiutinelementin kartion kiinnityksen joustavuus
C_{MS}	kaiutinelementin kartion kiinnityksen mekaaninen kokonaisjoustavuus
c	äänennopeus
c_K	äänennopeus kiinteässä aineessa
c_s	äänennopeus levyssä, pituussuuntaan
c_V	vaimennus
E	kimmokerroin
e_g	vahvistimen tuottama jännite
F	voima
f	taajuus
f_N	mooditaajuus
f_r	levyn ominaisresonanssitaajuus
f_s	näytteenottotaajuus

f_0	kaiutinelementin alin ominaisresonanssitaajuus tai refleksikotelon viritystaajuus
$H_n(\omega)$	logaritminen taajuusvaste tietyistä kulmista laskettuna
$H_w(\omega)$	tehovaste
I	virta
I_S	intensiteetti
k	aaltoluku
L	induktanssi
L_A	akustinen induktanssi
L_S	seinämän pinta-ala, johon kaiutinelementti on kiinnitetty
l	levyn pituus
l_i	putken pituus, jossa ilmamassa on
l_j	johtimen pituus
l_0	levyn alkuperäinen pituus
l'	refleksiputken pituus
M	materiaalin pinnan tiheys
M_A	akustinen massa
M_{A1}	akustinen säteilymassa kaiutinelementin etupuolella
M_{A2}	akustinen säteilymassa refleksi-putken etupuolella
M_{AB}	kaiutinkotelon sisällä olevan ilman akustinen massa
M_{AD}	kaiutinelementin kartion ja puhekelan akustinen massa
M_{AP}	refleksiputkessa olevan ilman akustinen massa
M_{MD}	kaiutinelementin kartion ja puhekelan massa
n	kokonaisluku 1,2,3, ...
P	ilmanpaine
P_S	säteilyteho
p	äänepaine
p_a	kaiutinelementin liikkeestä pääteltävä ilman paineen lisäys
p_c	painelähde kaiuttimen virtapiirianalogiassa
p_k	kaasun paine
Q	varaus
R	resistanssi
R_A	akustinen resistanssi
R_{AB}	kaiutinkotelon akustinen resistanssi
R_{AP}	refleksiputken akustinen resistanssi
R_{AS}	kaiutinelementin kartion kiinnitysten akustinen resistanssi
R_{AR1}	kaiutinelementin etupuolinen akustinen säteilyresistanssi
R_{AR2}	refleksiputken etupuolinen akustinen säteilyresistanssi

R_E	puhekelan sähköinen resistanssi
R_F	kaiutinkotelon seinämään kiinnitetyn vaimennusmateriaalin akustinen resistanssi
R_G	vahvistimen sähköinen resistanssi
R_{MS}	kaiutinelementin kartion kiinnitysten mekaaninen resistanssi
R_S	painelähteen akustinen resistanssi
r	levyn tuottama äänen vaimennus
r_s	moodin navan säde
r_{ms}	männän säde
r_0	levyn tuottama äänen vaimennus
S	pinta-ala
S_D	kaiutinelementin tehollinen säteilypinta-ala
S_M	kaiutinkotelon seinämään kiinnitetyt vaimennusmateriaalin pinta-ala
t	aika
t_h	levyn paksuus
U	tilavuusnopeus
V	kaiutinkotelon tilavuus
V_0	kaiutinkotelon sisällä olevan ilmamassan tilavuus
V_B	kaiutinkotelon tilavuus (sisältäen vaimennusmateriaalin tilavuuden)
V_M	kaiutinkotelon sisällä olevan vaimennusmateriaalin tilavuus
v	hiukkasnopeus
v_j	johtimen nopeus
w	levyn leveys
x	suora etäisyys elementistä kuulijalle
x_t	apumuuttuja, jonka avulla määritellään B_K
y	etäisyys elementistä etulevyn kulmaan, jossa diffraktio tapahtuu
z	etäisyys etulevyn kulmasta kuulijalle
Z_a	akustinen impedanssi
Z_A	elementin akustinen impedanssi
Z_K	kaiutinkotelon ilmatilan impedanssi
Z_M	elementin mekaaninen impedanssi
Z_{RP}	refleksiputken impedanssi
Z_S	elementin sähköinen impedanssi
Z_{ES}	äärettömään suureen levyyn kiinnitetyn männän säteilyimpedanssi
Δ	heijastuneen ja alkuperäisen signaalin kulkeman matkan erotus
Δl	levyn pituuden muutos
λ	äänisignaalin aallonpituus
γ	adiabaattinen vakio

ε	sähkömotorinen voima
μ	kinemaattinen viskositeettikerroin
μ_d	dynaaminen viskositeettikerroin
μ_p	ilman permeabiliteetti
ν	Poissonin vakio
ρ	ilman tiheys
ρ_k	kaasun tiheys
ρ_s	levyn tiheys
ξ	kaiutinelementin liikkuma matka tasapainotilasta
ξ_V	vaimennussuhde

Kuvat

2.1	Dynaaminen kaiutinelementti [2]	3
2.2	Malliesimerkki kaiutinelementistä	4
2.3	SEAS Prestige H1216-08 CA15RLY elementin mittaustulokset	5
2.4	Jakosuodattimen piirikaavio	6
2.5	Diskantti- ja basso-keskiäänielementtien taajuusvasteet [17].	7
2.6	Diskantti- ja basso-keskiäänielementtien taajuusvasteet [17].	7
2.7	Kaiutinkotelon aiheuttama diffraktio [1]	8
2.8	Eri kotelomallien taajuusvasteet [25].	10
2.9	Suljettu kaiutinkotelo (a) ja refleksikotelo (b) [38]	11
2.10	Taajuusvasteet kotelolle ja äärettömälle etulevyllä	12
2.11	Levyn resonanssitaajuuksista	13
2.12	Teoreettinen kuva levyn värähtelyn määräytymisestä [5].	13
2.13	Ensimmäisen asteen vaimennettu värähtelijä [12]	15
2.14	Eri tuentatavat sekä niiden ominaisresonanssitaajuudet [19]	16
2.15	Yksinkertaistettu virtapiirianalogia refleksikotelokaiuttimelle	19
2.16	Kaiuttimen akustinen virtapiirianalogia [6]	19
2.17	Kuvaaja muuttujan B_K määrittämiseksi. [6]	22
2.18	Korvan anatomia [40] : 1) Kallo 2) Korvakäytävä 3) Korvalehti 4) Tärykalvo 5) Soikea ikkuna	
3.1	Aurora kiiltävällä pintakäsittelyllä [30]	28
3.2	Balmoral kiiltävällä pintakäsittelyllä [30]	29
3.3	Varpaisjärven musta kiiltävällä pintakäsittelyllä [30]	29

3.4	Materiaalin mittauksessa käytetyt kytkennät	30
3.5	PCB Piezotronics 086C01 impulssivasara [28]	31
3.6	Kiihtyvyyssanturin toimintaperiaate [27]	32
3.7	Varpaisjärven mustan kiihtyvyyssvaste ja napa-nolla-kuvio	34
3.8	Kivilevyjen kiihtyvyyssvasteet	39
3.9	Puulevyjen kiihtyvyyssvasteet	40
4.1	Mallikaiutin Tannoy Mercury F1	42
4.2	Mittauksessa käytetyt kytkennät	43
4.3	Mallikaiuttimen taajuusvaste kulman ollessa 0°	44
4.4	Mallikaiuttimen taajuusvasteet eri kulmista	45
4.5	Mallikaiuttimen tehovaste horisontaalitasossa	46
4.6	Mallikaiuttimen mikrofonilla ja kiihtyvyyssanturilla mitattu vaste. . . .	46
5.1	Prototyypikaiutin.	48
5.2	Prototyypikaiuttimen taajuusvaste kulman ollessa 0°	49
5.3	Prototyypikaiuttimen taajuusvasteet eri kulmista	50
5.4	Prototyypikaiuttimen tehovaste	51
5.5	Prototyypikotelon mikrofonilla ja kiihtyvyyssanturilla mitattu vaste. . .	51
6.1	Kaiuttimien taajuusvasteet kulman ollessa 0°	54
6.2	Kaiuttimien taajuusvasteiden erotukset kulman ollessa 0°	54

Taulukot

3.1	Materiaalien mittauksessa käytetyt työvälineet	30
3.2	Kivilevyjen mittaustulokset	35
3.3	Puulevyjen mittaustulokset	37
4.1	Kaiuttimen tekniset ominaisuudet.	41
4.2	Mittauksessa käytetyt työvälineet.	43
5.1	Prototyyppi kaiuttimen tekniset ominaisuudet.	47

Luku 1

Johdanto

Kaiutinkoteloita on vuosien saatossa valmistettu mitä erilaisimmista materiaaleista. Suosituimpana materiaalina on kuitenkin säilynyt puu ja sen jalostetut muodot, kuten MDF-, vaneri- ja lastulevy. Kotelomateriaalin valinta vaikuttaa osaltaan kaiuttimen äänentoistoon. Ihanteellisessa tilanteessa ääntä säteilisi ainoastaan kaiutinelementti. Näin ei asian laita kuitenkaan käytännössä koskaan ole.

Tämän diplomityön tarkoituksena on tutkia kiven soveltuvuutta kaiutinkotelomateriaaliksi. Työn teettää Palin Granit Oy, louhimoyritys, joka valmistaa kivistä eri tuotteita. Yrityksen kannalta kiinnostavaa on heidän kivimateriaalituotevalikoimansa laajentaminen. Työssä tutkitaan kolmen eri kivityypin vibroakustisia ominaisuuksia. Näitä tuloksia vertaillaan perinteisempiin materiaaleihin. Mittaustulokset esitellään kappaleessa 3. Aikaisemmassa kirjallisuudessa ei ole juurikaan mittaustuloksia kivien ominaisuuksista, vaikka kaupallisia tuotteita onkin markkinoilla. Kotelomateriaalien teknisiä ominaisuuksia on muutenkin tutkittu melko vähän, ja nämäkin tutkimukset keskittyvät perinteisempiin materiaaleihin. Oletettavasti kiven etuihin, puuhun nähden, kuuluvat sen suurempi jäykkyys sekä massa. Heikkouksina ovat mahdollisesti työstettävyys sekä hinta.

Materiaalien vertailun lisäksi työn aikana valmistetaan kivistä prototyyppikaiutin, kappale 5. Prototyypin mallina toimii mallikaiutin, joka esitellään kappaleessa 4. Prototyypin kivimateriaali valitaan tehtyjen mittausten perusteella.

Tärkeimpänä vertailuna toimii mallikaiuttimen ja prototyypin taajuusvasteiden vertailu. Taajuusvaste kertoo kuulijan kannalta olennaisimman kaiuttimen äänenlaadusta. Taajuusvasteiden erot ja niiden merkitykset on esitelty kappaleessa 6.

Luku 2

Yleistä teoriaa kaiuttimista

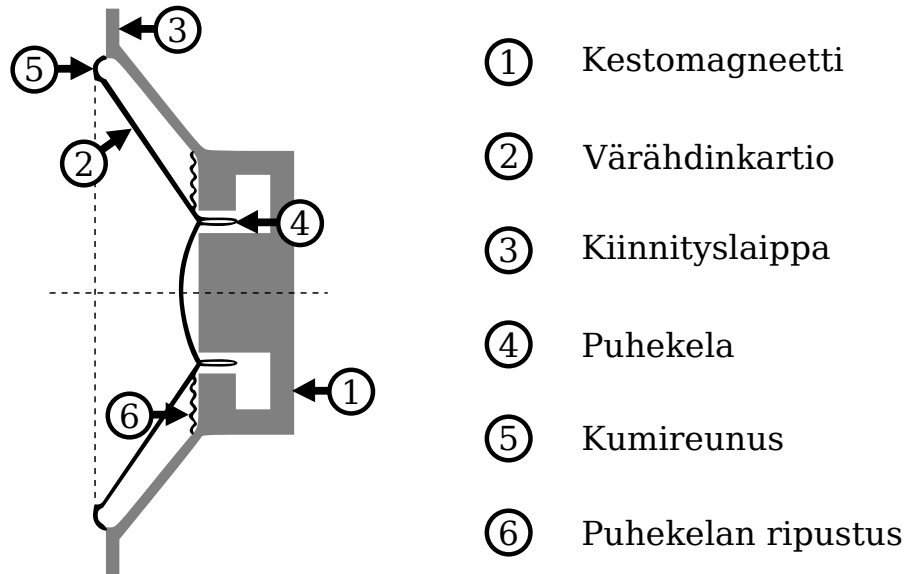
2.1 Kaiuttimen rakenne

Kaiutin on järjestelmä, joka muuttaa sähköisen signaalin ilmanpaineen vaihteluksi [29]. Tämä ilmanpaineen vaihtelu havaitaan äänenä. Kuluttajamarkkinoille suunnitellut kaiuttimet ovat yleensä passiivisia, monitieperiaatteen mukaan tehtyjä ja dynaamisilla elementeillä varustettuja. Tämänlaisessa kaiuttimessa on kaksi tai useampia elementtejä. Elementtien tehtävänä on toistaa tiettyä osaa kuultavasta taajuusalueesta, diskantin korkeita ääniä, keskiäänielementin keskitaajuuksia ja basson matalia taajuuksia. Jakosuotimen tehtävänä on suodattaa kaiuttimeen tuleva signaali elementeille sopiviin taajuusalueisiin. Kaiuttimien yleisestä teoriasta kiinnostuneita suositellaan tutustumaan seuraaviin lähteisiin [8, 10].

2.2 Dynaaminen kaiutinelementti

Elementti on muunnin sähköisen signaalin ja äänen välillä. Kuvassa 2.1 on esitetty poikkileikkaus dynaamisesta kaiutinelementistä. Värähdinkartioon (2) kiinnitettyyn puhekelaan (4) johdetaan vaihtojännitettä. Ympäröivät kestopaaneetit (1) tuottavat magneettivuon B , jonka ansiosta puhekelaan vaikuttaa voima F kaavan (2.1) mukaan. Voiman suunta muuttuu virran I funktiona. Elementti on ripustettu siten, että se voi liikkua vain yhden akselin suuntaisesti. Puhekelan pituus magneettivuohon nähden on l_j .

$$F = Bl_j I \quad (2.1)$$



Kuva 2.1: Dynaaminen kaiuttimelementti [2]

Elementin liikkeestä johtuen puhekela toimii jännitelähteenä, siten että kelan nopeus v_j indusoi puhekelaan jännitteen ε kaavan (2.2) mukaan.

$$\varepsilon = Bl_j v_j \quad (2.2)$$

Nykyaikaiset vahvistimet suunnitellaan siten, että niissä on hyvin pieni lähtöimpedanssi kaiuttimen sähköiseen impedanssiin verrattuna. Tämä estää puhekelaan indusoituneen jännitteen kulkemisen takaisin vahvistimeen. Käytännössä kaikki vahvistimet eivät ole hyvin suunniteltuja lähtöimpedanssi osalta. Osa kaiuttimista on myös suunniteltu huonosti, tämän kaltaiset kaiuttimet ovat hankalia kuormia vahvistimelle. Jos äänentoistojärjestelmässä on keho vahvistin ja hankalat kaiuttimet, on häiriöitä oletettavissa. Näitä häiriöitä ilmenee, kun äänentoistojärjestelmää käytetään suurilla tehotasoilla.

Tätä kaiuttimista vahvistimeen kulkeutuvaa häiriötä on tutkittu jonkin verran [35]. Kyseisessä tutkimuksessa mitattiin sähkömotorisen voiman aiheuttaman häiriön suuruutta, 100 watin vahvistimella ja 4 ohmin kaiuttimella häiriösignaalin suuruudeksi mitattiin jopa 5 voltia.

2.3 Malliesimerkki dynaamisesta kaiutinelementistä

Tässä kappaleessa käydään tarkemmin läpi kaiutintelementin ominaisuuksia. Mallina toimii SEAS Prestige H1216-08 CA15RLY, joka on esitetty kuvassa 2.2. Lähteestä [31], löytyvät elementin tarkemmat tiedot.



Kuva 2.2: Malliesimerkki kaiutinelementistä

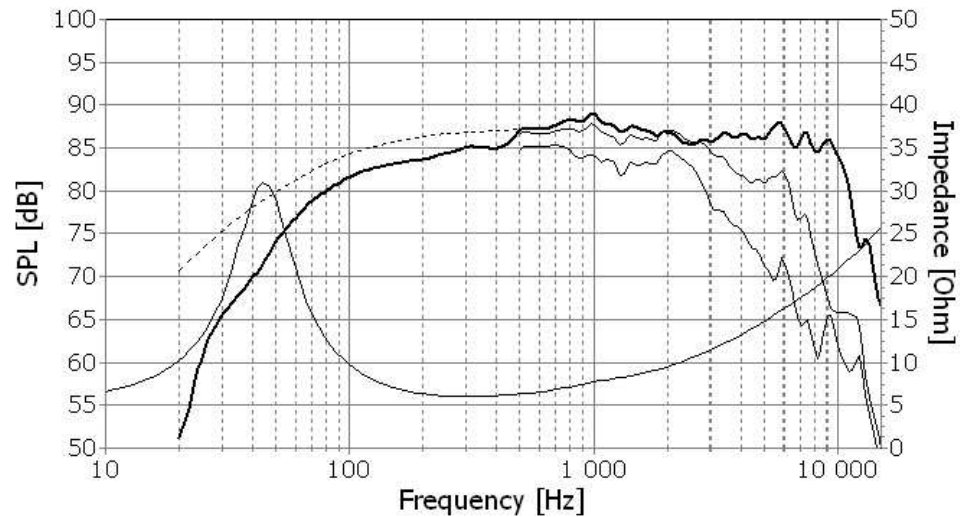
Kyseinen elementti valittiin esimerkiksi, koska valmistaja dokumentoi tuotteensa hyvin ja kyseisen elementin halkaisija on sama, kuin mallikaiuttimen bassoelementin. Elementin kartio on päällystettyä paperia, kun taas mallikaiuttimen kartio on mitä ilmeisimmin muotoon puristettua muovia.

Kuvassa 2.3 on esitetty esimerkkielementin mittaustulokset [31]. Mittaukset on tehty kiinnittämällä elementti suljettuun kaiutinkoteloon, jonka tilavuus on seitsemän litraa. Kaiutinta on ohjattu jännitteellä, joka tuottaa elementissä yhden watin sähköistä tehoa.

Kuvassa tummalla viivalla on piirretty suoraan edestä mitattu taajuusvaste. Sen alapuolella on 30° ja 60° kulmassa mitatut vasteet. Elementin taajuusvaste on suoraan edestä mitattuna melko tasainen. Myös elementin suuntavuus on hyvin hallittua, sillä eri kulmista mitatut vasteet noudattelevat suoraa taajuusvastetta.

Pistemäisellä viivalla on esitetään laskettu vaste, kun elementti on kiinnitetty äärettömän suureen etulevyyn. Vasteen todenperäisyyttä on hankala varmistaa, mutta ainakin elementin suora taajuusvaste vaimenee suunnilleen samassa suhteessa, kuin laskettukin vaste.

Viimeisenä kuvassa esitellään kaiutinelementin mitattu sähköinen impedanssi. Tämä impedanssi kuvaa sitä, millaisena kuormana kaiutinelementti näkyy muulle järjes-



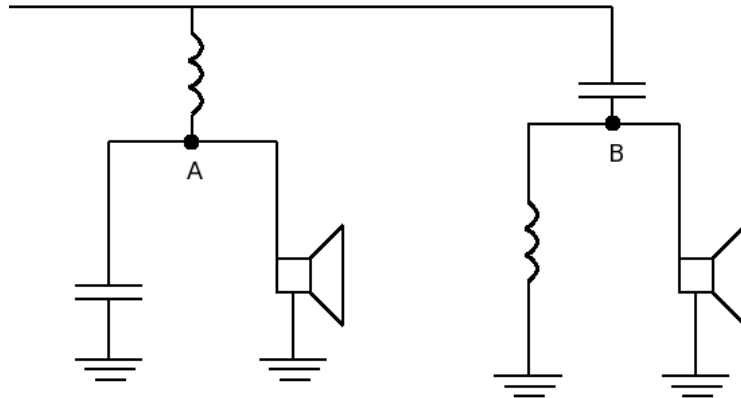
Kuva 2.3: SEAS Prestige H1216-08 CA15RLY elementin mittaustulokset

telmälle. Sen kuvaaja poikkeaa muodoltaan muista käyristä ja sen asteikko on sijoitettu kuvan oikeaan laitaan. Impedanssikäyrästä nähdään, että elementin resonanssitaajuus on noin 45 hertsiä. Ennen resonanssitaajuutta impedanssiin vaikuttaa elementin jäykkyys ja sen jälkeen elementin massa. Resonanssitaajudella impedanssiin vaikuttaa elementissä tapahtuvat häviöt. Noin 200 hertsin jälkeen elementin induktanssi nostaa käyrää korkeammille taajuuksille mentäessä.

2.4 Jakosuodin

Kaiuttimen äänentoistossa pyritään mahdollisimman tasaiseen taajuusvasteeseen, joka ideaalisessa tapauksessa kattaisi koko kuultavan äänen alueen (20 - 20000 Hz). Mahdollisimman laajan ja tasaisen taajuusvasteen tuottamiseksi kaiuttimissa on usein useampi elementti, eli kyseessä on monitiekaiutin. Jakosuodin ohjaa kullekin elementille taajuusalueen, jonka toistoon se sopii parhaiten. Yleisin monitiekaiutin on kaksitiekaiutin, jonka jakotaajuus on yleensä 1500 - 5000 kilohertsin välillä.

Jakosuotimen rakenne riippuu kaiuttimen elementtien määrästä sekä siitä, onko kyseessä aktiivinen vai passiivinen kaiutin. Aktiivisessa kaiuttimessa on kotelon, elementin ja jakosuotimen lisäksi oma vahvistin, joka on suunniteltu juuri kyseistä kaiutinta varten. Passiivisessa kaiuttimessa ei ole omaa vahvistinta, vaikka se muuten onkin samanlainen. Jakosuodinta tarvitaan vain monitiekaiuttimissa. Passiivisessa kaksitiekaiuttimessa jakosuodin koostuu ylipäästö- ja alipäästösuoatimesta, kuten kuvasta



Kuva 2.4: Jakosuodattimen piirikaavio, jossa on käytetty toisen asteen ali- ja ylipäästösuolettimia.

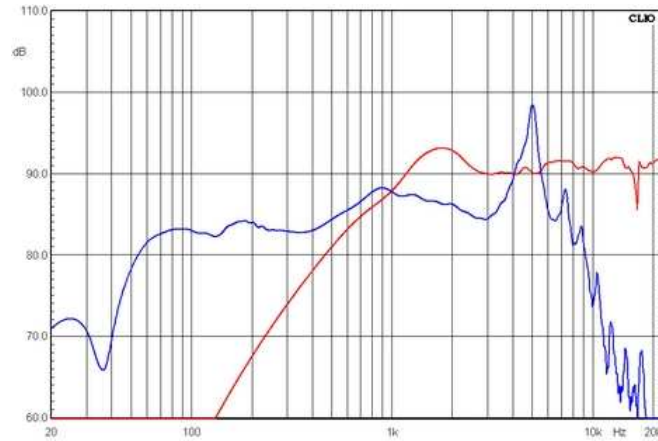
2.4 nähdään. Alipäästösuolettin, eli solmussa A oleva kytkentä, koostuu kelasta ja kondensaattorista. Matalilla taajuuksilla kela vastaa oikosulkua, jolloin solmuun pääsee jännite, jonka taajuus on alhainen. Elementin kanssa rinnan kytketty kondensaattori taas toimii korkeilla taajuuksilla oikosulkuna. Tämän vuoksi elementtiin ei ohjaudu korkeita taajuuksia, joiden toistamiseen se ei sovellu.

Solmussa B on ylipäästösuolettin. Solmun edessä olevan kondensaattorin impedanssi on erittäin suuri matalilla taajuuksilla, ja korkeilla taajuuksilla se vastaa oikosulkua. Näin solmuun tulleesta signaalista on suodattuneet kaikkein matalimmat taajuudet. Solmun jälkeen tuleva kela taas vastaa matalilla taajuuksilla oikosulkua ja korkeilla taajuuksilla sillä on vastaavasti suuri impedanssi. Matalimmat taajuudet maadoittuvat ja elementille ohjautuvat halutut korkeammat taajuudet.

Jakosuotimen tärkeitä ominaisuuksia ovat jakotaajuus ja jakosuotimen asteluku. Ne on valittava siten, että lopullinen taajuusvaste on mahdollisimman tasainen. Jakosuodattimen asteluku määrittelee, miten jyrkkiä elementtien suodattimet ovat. Jakotaajuus taas nimensä mukaan rajaa elementeillä toistettavan taajuusalueen ja se on kummallekin elementille sama. Kaksitiekaiuttimen bassoelementillä jakotaajuus toimii alipäästösuolettimen estokaistan rajataajuutena, diskantilla jakotaajuus on ylipäästösuolettimen päästökaistan rajataajuus. Bassoelementiltä suodatetaan korkeat taajuudet pois, sillä ne tuottavat häiritseviä spektriipiikkejä. Diskanttielementiltä suodatetaan matalat taajuudet pois, sillä ne tuottavat elementissä säröytymistä.

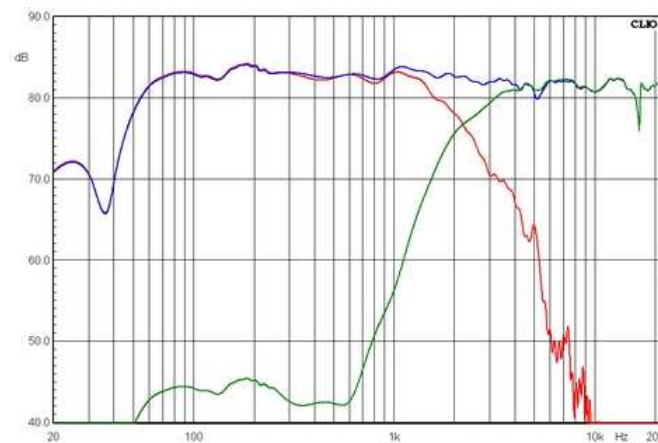
Seuraavassa esimerkki todellisen kaiuttimen jakosuodattimesta [17]. Kuvassa 2.5 on diskanttielementin taajuusvaste punaisella ja basso-keskiäänielementin taajuus-

vaste sinisellä. Vasteet on mitattu elementtien ollessa kiinni kaiuttimessa ja toisen elementin ollessa irtikytkettynä. Basso-keskiäänielementin vasteessa näkyy selvästi häiritsevä spektripiikki 5000 kilohertsin taajuudella. Kuvassa 2.6 on jakosuodin kyt-



Kuva 2.5: Diskantti- ja basso-keskiäänielementtien taajuusvasteet [17].

ketty päälle ja sen jakotaajuus on noin 2300 hertsiä. Kuvassa sinisellä on kaiuttimen taajuusvaste, eli molemmat elementit ovat kytkettyinä. Punaisella on esitetty basso-keskiäänielementin taajuusvaste ja diskanttielementin taajuusvaste on vihreällä.



Kuva 2.6: Diskantti- ja basso-keskiäänielementtien taajuusvasteet [17].

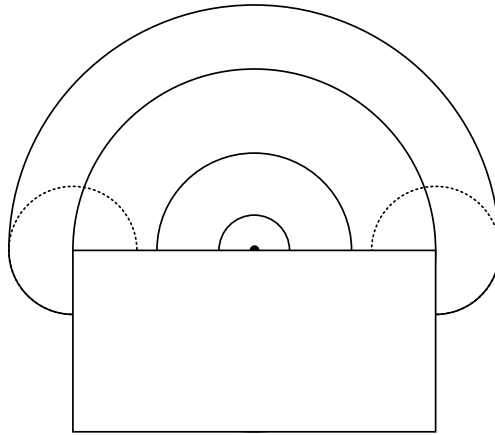
2.5 Kaiutinkotelo

Yksinkertaisin kaiutinkotelorakenne on etulevy, johon elementti on kiinnitetty. Elementin kalvon liikahtaessa eteenpäin ilmanpaine sen edessä kasvaa ja vastaavasti ta-

kana laskee. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että etulevyn eri puolilla elementin säteilemät äänisignaalit ovat vastakkaisvaiheisia. Etulevyn tarkoitus on estää etu- ja takapuolen eri vaiheisten signaalien toisensa kumoava summautuminen eli akustinen oikosulku. Teoriassa tämä vaatisi äärettömän kokoisen etulevyn toimiakseen täydellisesti.

2.5.1 Kotelon muoto ja diffraktio

"Diffraktio on aaltorintaman etenemissuunnan muutos epäjatkuvuuden tai esteen vuoksi (nopeuden säilyessä samana) [41]." Kaiuttimessa ongelmaksi muodostuu etulevyn aiheuttama diffraktio. Kuvassa 2.7 on esitetty diffraktion vaikutus suorakulmaisen kaiutinkotelon tapauksessa. Kiinteällä viivalla piirretyt aallot ovat positiivisessa vai-



Kuva 2.7: Kaiutinkotelon aiheuttama diffraktio [1]

heessa ja pistemäisellä viivalla piirretyt negatiivisessa vaiheessa. Etulevyn suuntaan etenevä ääniaalto saavuttaa levyn laidan, jolloin laita toimii eräänlaisena toisiolähteenä. Tämän lähteen signaali on alkuperäisestä, kuulijalle ensimmäisenä saapuneesta signaalista, hieman myöhässä ja vastakkaisessa vaiheessa [25]. Superpositioperiaatteen mukaan heijastunut signaali heikentää tai vahvistaa amplitudinsa verran alkuperäistä signaalia. Olkoon Δ heijastuneen signaalin ja alkuperäisen signaalin kulke- mien matkojen ero kuuntelupisteessä. Olkoon x suoran äänen etäisyys kuulijalle, y on etäisyys lähteestä etulevyn kulmaan ja z etäisyys kulmasta kuulijalle. Δ voidaan nyt määritellä kaavan 2.3 mukaan.

$$\Delta = (y + z) - x \quad (2.3)$$

Oletetaan äänilähteen lähettävän sinimuotoista signaalia, jonka aallonpituus on λ . Etulevyn kulmassa tapahtuvan vaiheenmuutoksen vuoksi heijastunut signaali vaikuttaa vähentävästi kun

$$\Delta = (2n - 1)\lambda/2 \quad (2.4)$$

ja vahvistavasti kun

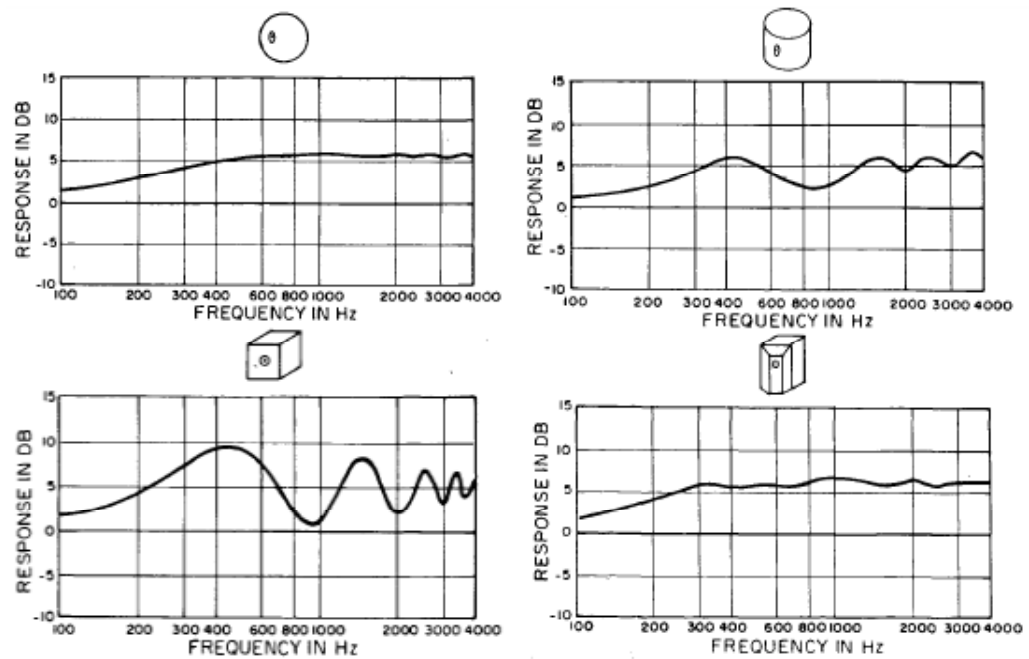
$$\Delta = n\lambda \quad (2.5)$$

Kaavoissa 2.4 ja 2.5 $n = 1, 2, 3, \dots$. Diffraction vaikutus on siis riippuvainen taajuudesta, etäisyyden ja äänennopeuden pysyessä muuttumattomina. Diffraction vaikutus taajuusvasteeseen on sama kuin kampasuotimella. Se lisää alkuperäiseen signaaliin viivästyneen version signaalista. Tämä summaus tuottaa taajuusvasteeseen säännöllisiä vaimentumia. Myös lattia tuottaa vastaavia häiriöitä. Lattiasta heijastuneet ääniaallot saapuvat kuuntelupisteeseen alkuperäistä signaalia myöhemmin, summautuvat siihen ja tuottavat kampasuodinefektin. Lattian tapauksessa viive-erot ovat luonnollisesti isompi, kuin diffraction tapauksessa.

Vuonna 1962 Harry F. Olson julkaisi artikkelinsa kaiutinkotelon muodon vaikutuksesta taajuusvasteeseen [25]. Tämä uraauurtava tutkielma kävi läpi kaksitoista eri kotelotyyppiä ja esitteli niiden taajuusvasteet. Diffraction vaikutuksesta taajuusvasteet vaihtelevat melko paljon. Kotelomateriaalina käytettiin metallia. Mittaustilanne oli joka kotelolle samanlainen, joten ainut taajuusvasteeseen vaikuttava tekijä oli kotelon muoto. Pallonmuotoinen kotelo tuotti parhaan tuloksen, koska siinä diffraktiota ei pääse juurikaan syntymään. Kuvassa 2.8 on esitelty joitakin Olsonin mittaamia kotelomalleja ja niiden taajuusvasteita. On helppo nähdä, että vasemman alakulman kotelo tuottaa huonoimman taajuusvasteen. Tämä johtuu kaiuttimen etulevystä, joka on mahdollisimman epäedullinen muodoltaan. Etulevyn jokainen sivu tuottaa samassa vaiheessa olevan diffraction, superpositioperiaatteen mukaan tuloksena on mahdollisimman voimakas ja häiritsevä diffraktio. Loiventamalla etulevyn kulmia saatiin taajuusvasteesta huomattavasti parempi, kuten kuvassa oikealla alhaalla olevan kaiuttimen vasteesta voidaan nähdä.

Diplomityön mallikaiuttimessa diffraction vaikutusta on pyritty vähentämään tekemällä etulevystä vain hieman elementtiä leveämpi sekä pyöristämällä levyn kulmat [18]. Elementtien sijoituksella voidaan myös vähentää diffraktiota. Jos elementit sijaitsevat etulevyssä epäsymmetrisesti, niiden diffraktio-ominaisuudet ovat erilaisia ja näin ollen vähemmän häiritseviä.

Jokaisella kotelon seinämällä on ominaisresonanssitaajuus, jolla se värähtelee kaikkein voimakkaimmin ja samalla päästää ääntä lävitseen kaikkein eniten. Tätä vuotoa pyritään välttämään, sillä se aiheuttaa häiriöitä elementin tuottamaan ääneen. Kuvan



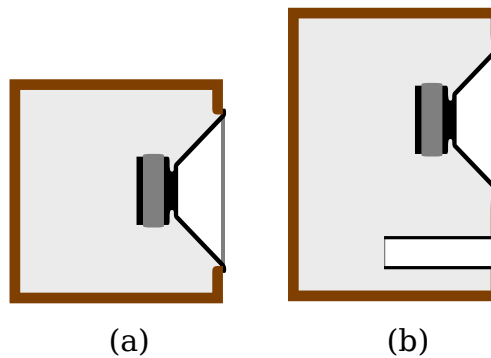
Kuva 2.8: Eri kotelomallien taajuusvasteet [25].

2.8 vasemmassa alakulmassa oleva kuutio on huonoin mahdollinen muoto kaiuttimelle, koska jokainen seinämä on saman muotoinen ja siten jokaisella seinämällä on sama ominaisresonanssitaajuus. Seinämien aiheuttamat häiriöt summautuvat ja osaltaan vaikuttavat kaiuttimen huonoon taajuusvasteeseen. Jotta tältä summautumiselta vältyttäisiin, tulisi kotelon syvyyden, korkeuden ja leveyden poiketa toisistaan vähintään 20 prosenttia [36]. Ominaisresonanssien vaikutuksen minimoimiseksi tulisi jokaisen seinämän olla keskenään erikokoinen.

2.5.2 Suljettu kotelo

Ideaalisessa tilanteessa kaiutin, joka on toteutettu suljetulla kotelolla, ei säteile ääntä elementin takaa kuulijalle. Todellisuudessa tämänlainen kaiutin säteilee ääntä joka suuntaan, sillä sen kotelon seinämät värähtelevät elementin liikkeen vaikutuksesta. Nämä värähtelevät seinämät tuottavat myös ääntä aiheuttaen häiriöitä elementin tuottamaan ääneen. Elementin tuottamaa ääntä vääristää myös diffraktio [8]. Nämä häiriöt näkyvät poikkeamina tasaisesta taajuusvasteesta. Mikäli koteloon suljetun ilmassan joustavuus on huomattavasti suurempi kuin elementin ripustusten joustavuus, vastaa kaiutin likimain äärettömän suurta etulevyä. Jos ilmassan joustavuus on pienempi, kutsutaan kaiutinta akustiseksi ilmajousijärjestelmäksi [29]. Kaiutin, joka on

toteutettu suljetulla kotelolla, on yleensä melko tehoton muuttamaan sähköistä signaalia ääneksi. Sen etuna on kaiuttimen pieni koko — hyvä äänenlaatu saadaan tuotettua pienelläkin kaiuttimella. Matalien äänien tuottaminen vaatii kohtalaisen suurien ilmamassojen liikuttamista. Pienessä kaiuttimessa elementin koko on luonnollisesti hyvin rajoitettu. Tämä ongelma yleensä kierretään käyttämällä pitkäiskuisia elementtejä. Suljettu kaiutinkotelo on esitelty kuvassa 2.9 (a).



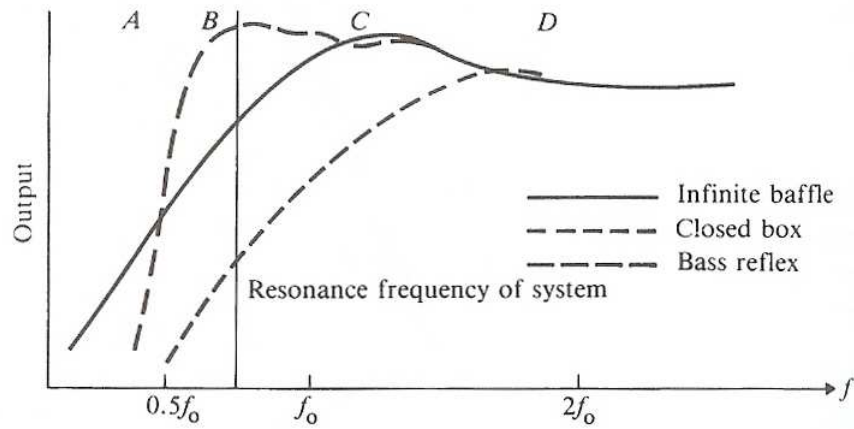
Kuva 2.9: Suljettu kaiutinkotelo (a) ja refleksikotelo (b) [38]

2.5.3 Refleksikotelo

Refleksikotelo on erittäin suosittu kotelotyyppi kuluttajamarkkinoilla. Kaiuttimeen asennettu refleksiputki lisää, pienillä taajuuksilla, elementin takaa säteilemän äänen suoraan ääneen. Tämän summauksen ansiosta kaiutin toistaa matalampia taajuuksia kuin suljetulla kotelolla toteutettu kaiutin. Tosin suljetulla kotelolla kaiuttimen vaste vaimenee loivasti matalilla taajuuksilla, 12 desibeliä oktaavikaistaa kohden. Refleksikotelossa taas vaste vaimenee jyrkästi 24 desibeliä oktaavikaistaa kohden.

Refleksiputken asentamisen jälkeen kotelo toimii käytännössä Helmholtz-resonaattorina, jonka toiseen päähän on kiinnitetty kaiutinelementti. Jotta putkesta tuleva ääni on samassa vaiheessa elementin säteilemän äänen kanssa, pitää refleksikotelon muodostaman Helmholtz-resonaattorin ominaistaajuus olla sama kuin elementin matalin ominaisresonanssitaajuus.

Kuvassa 2.10 on esitetty periaatteelliset taajuusvasteet suljetulle-, refleksikotelolle ja äärettömässä levyssä kiinni olevalle elementille. Kuvassa f_0 on elementin alin ominaisresonanssitaajuus sekä refleksikotelon viritystaajuus.



Kuva 2.10: Periaatteelliset taajuusvasteet suljetulle-, refleksikotelolle ja äärettömälle etulevyllä [29].

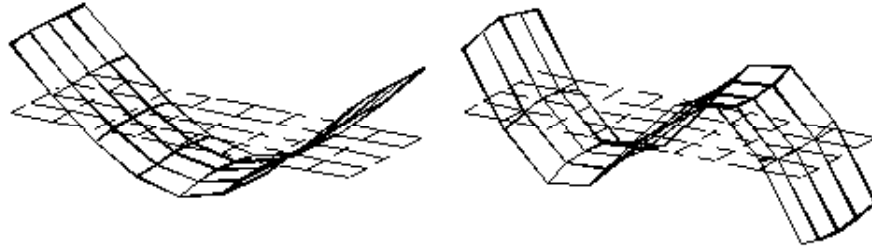
2.5.4 Kotelomateriaalin vaikutus ääneen

”Ei ole olemassa ideaalista kotelomateriaalia, on vain ideaali tavoite — materiaalin ei tulisi millään tavalla vaikuttaa tuotettavaan ääneen” [8]. Tämä kommentti kiteyttää hyvin sen, mitä kotelomateriaalilta vaaditaan. Totuus on kuitenkin se, että kotelon seinämät säteilevät ääntä ja näin ollen vaikuttavat lopputulokseen. Erityisen herkkiä kotelon seinämät ovat värähtelemään ominaisresonanssitaajuuksilla [5]. Kaiutinkotelon kannalta ongelmallisin on matalin ominaisresonanssitaajuus, sillä kyseisellä taajudella levy säteilee eniten ääntä. Tämän taajuuden analyttinen ratkaiseminen on erittäin hankalaa, ja siksi kaiutinkotelon seinämän ominaisresonanssitaajuuden määrittäminen on helpompaa laskennallisilla menetelmillä, kuten elementtimenetelmällä. Elementtimenetelmän hyödyntämisestä akustiikassa löytyy tietoa seuraavasta lähteestä [11]. Vapaasti ripustetun levyn taivutusaallon ominaisresonanssitaajuus määritellään kaavassa (2.6) [33]. Levyn pituus on L ja c_s on poikittaisen taivutusaallon nopeus levyssä (etenee pituussuuntaan nähden).

$$f_r = \frac{c_s}{2} \times \frac{1}{L} \quad (2.6)$$

Kuvassa 2.11 on esitetty suorakulmaisen levyn ensimmäinen ja toinen ominaistajuus taivutusaallolle. Kuvassa levy taipuu pituussuuntaansa nähden. Kotelossa kiinni ollessaan levy luonnollisesti taipuu muillakin tavoin.

Ääniaallon nopeus levyssä määritellään kahdella tavalla. Vaihenopeudella tarkoitetaan nopeutta, jolla ääniaallon vaihe muuttuu. Tämä nopeus on voimakkaasti riippuvainen aallonpituudesta. Ryhmänopeudella tarkoitetaan nopeutta, jolla ääniaallon

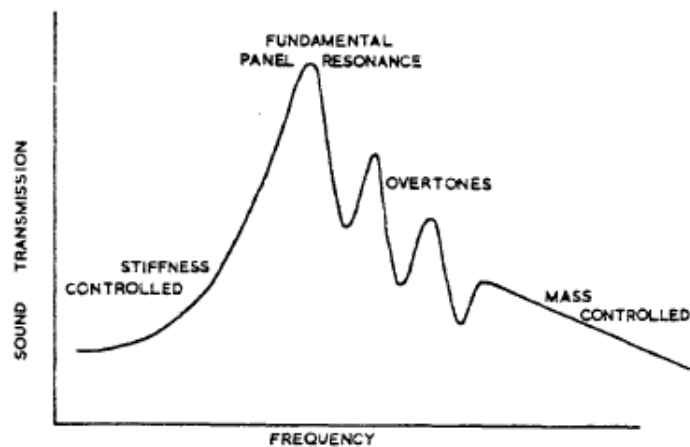


Kuva 2.11: Suorakaiteen muotoisen levyn ensimmäinen ja toinen ominaisresonanssitaajuus [24].

amplitudi muuttuu. Tämän ryhmänopeuden voidaan ajatella olevan myös signaalin aaltomuodon nopeus, eli se miten nopeasti signaalin kuljettama informaatio etenee.

On kolme tapaa, joilla kotelon seinämät alkavat värähdellä [19]. Ilmeisin on tietysti elementin värähtelyn aiheuttamat ilmanpaineen muutokset kotelon sisällä, jolloin seinämät värähtelevät samalla taajudella kuin elementti. Toisena on elementin liikkeeseen reagoiva levy. Tämä tarkoittaa etulevyä, joka liikkuu jonkin verran elementin mukana. Kolmantena on muihin seinämiin reagoiva levy, esimerkiksi etulevyssä kiinni oleva levy, joka värähtelee myös etulevyn liikkeiden vuoksi.

E erityisen herkkiä kotelon seinämät ovat värähtelemään levyn alimman ominaisresonanssitaajuuden mukaan [5]. Mitä jäykempi ja tiheämpi materiaali on, sitä enemmän energiaa värähtelyjen herättäminen kotelossa vaatii [10]. Ominaisresonanssitaajudella levyn värähtelyyn vaikuttaa materiaalin häviöt. Tämän taajuuden alapuolella värähtelyyn vaikuttaa jäykkyys ja yläpuolella taas tiheys. Kuvassa 2.12 on esitetty teoreettinen malli levyn värähtelyn määräytymisestä.



Kuva 2.12: Teoreettinen kuva levyn värähtelyn määräytymisestä [5].

Tiheyden vaikutusta levyn kykyyn vaimentaa läpäisevää ääntä kuvataan massalaiilla [7]. Kaavassa (2.7) vaimennus r_0 on taajuuden f funktio. Levyn tiheys on ρ_s , ilman tiheys ρ ja äänen nopeus c .

$$r_0 = 20 \log\left(1 + \frac{\pi f \rho_s}{\rho c}\right) \quad (2.7)$$

Massalaista on johdettu myös hieman yksinkertaisempi versio, kaava (2.8) [16]. Vaimennus on nyt r , taajuus on jälleen f ja muuttuja M on materiaalin pinnan tiheys.

$$r = 20 \log(fM) - 47 \quad (2.8)$$

Jäykkyydellä tarkoitetaan joustavan kappaleen kykyä vastusta voiman aiheuttamaa taipumista ja se määritellään joustavuuden C_A käänteislukuna [21]. Kaavassa (2.9) on esitetty jäykkyys pituuden suhteen. Muuttujat E , t_h ja w ovat levyn kimmokerroin, paksuus ja leveys. Levyn pituus on l .

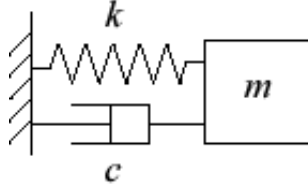
$$\frac{1}{C_A} = \frac{Et_h w}{l} \quad (2.9)$$

Kimmokerroin on luku, joka kuvaa kappaleen venymistä voiman vaikutuksesta. Sitä kutsutaan toisinaan nimellä Youngin moduuli. Kimmokertoimen E lisäksi levyn käyttäytymiseen vaikuttavat myös liukukerroin ja puristuvuuskerroin. Kaiutinkotelon tapauksessa hallitsevin on kuitenkin kimmokerroin, joten muita kertoimia ei tämän enempää käsitellä. Kaavassa (2.10) F on venyttävä voima ja l_0 on levyn alkuperäinen pituus. A_0 on poikkipinta-ala, johon voima vaikuttaa ja Δl on levyn pituuden muutos. Tämä pituuden muutos voiman vaikutuksesta ei tuota värähtelyä, joka säteilisi ääntä.

$$E = \frac{Fl_0}{A_0 \Delta l} \quad (2.10)$$

Kolmas materiaalin ominaisuus, joka on oleellinen kaiutinkoteloista puhuttaessa, on sen kyky vaimentaa värähtelyä. Tämä näkyy etenkin spektripiikkien amplitudeissa. Mitä voimakkaammin materiaali vaimentaa värähtelyä, sitä matalampia spektripiikit ovat. Ewinsin kirjassa [14] on käsitelty materiaalin kykyä vaimentaa värähtelyä. Diplomityön kannalta tärkein vaimennustyyppi on viskoosinen vaimennus, joka määritellään ensimmäisen vapausasteen värähtelijän kautta, kuva 2.13.

Ensimmäisen asteen värähtelijällä on yksi ominaisresonanssitaajuus, jolla se värähtelee kaikkein voimakkaimmin. Vaikka kivilevyllä on useampia ominaisresonanssitaajuuksia, voidaan yksittäistä taajuutta tarkastella erikseen, ikään kuin ensimmäisen asteen värähtelijänä. Viskoosiselle vaimennukselle on määritelty myös taajuusvaste $\alpha(\omega)$, kaava (2.11) [14]. Kaavassa k on jousivakio ja ξ_V vaimennussuhde, joka on tarkemmin määritelty kaavassa (2.12). Tässä c_V on vaimennus ja $\bar{\omega}_0$ on värähtelijän



Kuva 2.13: Ensimmäisen asteen vaimennettu värähtelijä [12]

ominaiskulmataajuus, kaava (2.13). Kulmataajuus ω on määritelty kaavassa (2.14), jossa f on taajuus.

$$\alpha(\omega) = \frac{1/k}{1 - (\omega/\bar{\omega}_0)^2 + 2i\xi_V(\omega/\bar{\omega}_0)} \quad (2.11)$$

$$\xi_V = \frac{c_V}{2\sqrt{km}} \quad (2.12)$$

$$\bar{\omega}_0 = \sqrt{k/m} \quad (2.13)$$

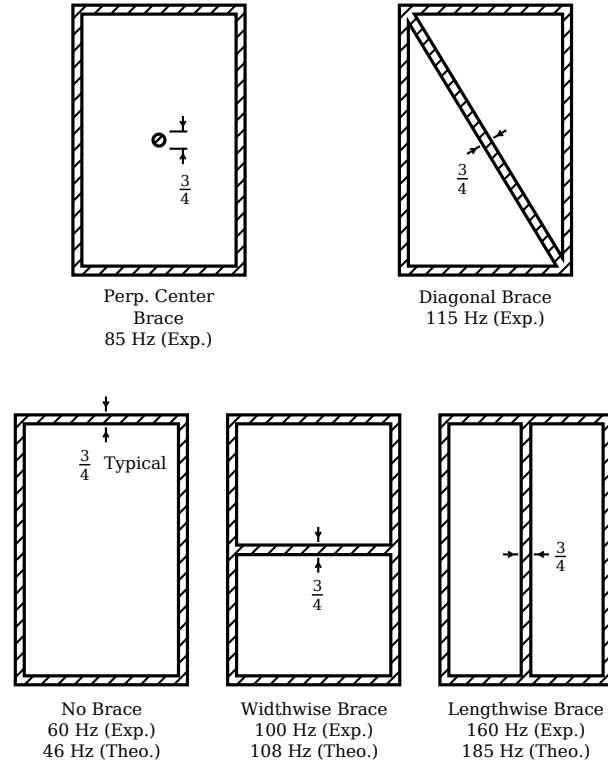
$$\omega = 2\pi f \quad (2.14)$$

2.5.5 Tukirakenteet ja vaimennusmateriaalit

Tukirakenteen tarkoitus on jäykistää rakennetta ja nostaa kotelon ominaisresonanssitaajuutta. Mitä korkeampi tämä taajuus on, sitä heikompi se on aiheuttamaan häiritsevää värähtelyä kotelossa. Iversonin mittausten [19] mukaan paras tapa on tukea levy sen pisimmän sivun suuntaisesti. Kuvassa 2.14 on esitetty eri tuentatapoja ja niiden lasketut ja mitatut ominaisresonanssitaajuudet. Kyseessä ovat siis yksittäisten levyjen, ei koteloiden, värähtelytaajuudet. Oletettavasti levyn normaalin suuntainen tuki (vasen ylärivissä) toimisi huomattavasti paremmin kotelossa, jossa se vaimentaisi vastakaisten seinien värähtelyjä. Bowers & Wilkins on kaiuttimissaan käyttänyt jo pitkään eräänlaista tukimatriisia kotelon sisällä [10]. Se koostuu levyistä, jotka jakavat kotelon pysty- ja vaakasuunnassa pienempiin osiin. Levyt ovat rei'itettyjä, joten kotelon sisällä ilmamassa on yhtenäinen.

Kotelon värähtelyjä voidaan pyrkiä vähentämään myös muotoilulla ja valmistustekniikalla. Jos kotelon muoto on luonnostaan jäykkä, kuten sylinteri tai pallo, vähenee tukirakenteiden tarve. Valmistustekniikka vaikuttaa kotelon materiaaliin ja muotoon. Esimerkiksi painevalulla voidaan valmistaa hyvinkin eksoottisen muotoisia kotelaita

ja materiaalina voidaan käyttää esimerkiksi metallia. Käytännössä olisi mahdollista valmistaa pallonmuotoinen kaiutin vaikkapa alumiinista.



Kuva 2.14: Eri tuentatavat sekä niiden ominaisresonanssitaajuuudet [19]

Vaimennusmateriaalin käyttö kotelon sisällä on aina suositeltavaa, sillä nimensä mukaisesti se vaimentaa kotelon sisäisiä ääniaaltoja. Vaimennus on tosin vähäisempää matalilla taajuuksilla [8, 10, 32]. Vaimennusmateriaalin käyttö lisää kotelossa olevan ilmassan joustavuutta C_A , sillä vaimennusmateriaali laskee äänennopeutta, joten elementin kannalta vaikutus on sama kuin isommalla kotelolla. Yleisimmät vaimennusmateriaalit ovat luonteeltaan huokoisia (kuten lasivilla) ja kuitumaisia (kuten villa tai puuvilla). Näiden materiaalien kimmokerroin E ja tiheys ρ ovat pieniä. Äänennopeus kiinteissä materiaaleissa määritellään kaavalla (2.15) [15]. Kaavasta nähdään helposti, miksi äänennopeus laskee, kun ääniaalto siirtyy ilmasta vaimennusmateriaaliin.

$$c_k = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.15)$$

Vaimennusmateriaali sijoitetaan kaiuttimeen yleensä vapaasti, eli sitä ei ole kiinnitetty mihinkään. Se ei kuitenkaan saa haitata elementtien liikettä.

Brandbury tutki julkaisussaan [9] etenkin villan ominaisuuksia vaimennusmateriaalina. Hän havaitsi, että villakerän käyttäminen vaimennusmateriaalina ei juurikaan muuttanut äänennopeutta toisin kuin jäykemmät materiaalit — vaan ainoastaan vaimensi signaalia. Syy tähän on villakuidun rakenne. Yksittäisen kuidun paksuus on vain 0,01 mm. Tämä on huomattavasti pienempi kuin kuultavan äänen aallonpituudet. Siksi villakuidut eivät värähtele ääniaaltojen mukana muuttaen näin äänennopeutta — vaan toimivat akustisena resistanssina R_A muuttaen äänienergiaa lämmöksi.

Toisenlainen tapa käyttää vaimennusmateriaalia on kiinnittää se suoraan kaiutin-kotelon seinämiin. Tämä materiaali on yleensä sangen toisen tyyppistä kuin aiemmin esitellyt. Vaimennusmateriaali toimii samalla periaatteella kuin tuetkin. Sen tarkoitus on vähentää kotelon seinämien värähtelyjä. Tällaisena vaimentimena on käytetty mm. kumia ja asfalttipinnoitusta. Vaimennusmateriaali venyy ja puristuu seinämän liikkeen mukana näin vaimentaen sen liikettä. Vaikkakin melko yleinen, niin tämä on tehoton tapa käyttää vaimennusmateriaalia, sillä ainut vaimennus tulee kyseisen materiaalin tiheyden muutoksesta [4]. Tehokkaampi tapa on sijoittaa vaimennusmateriaali kahden jäykemmän levyn väliin, jolloin sen aiheuttama levyjen välinen kitka vaimentaa värähtelyä tehokkaasti [10].

2.6 Akustisen järjestelmän sijaiskytkennät

Tämän kappaleen tarkoituksena on valottaa tarkemmin sitä, miten eri kaiuttimien osat ovat vuorovaikutuksessa keskenään, kun kotelo oletetaan jäykäksi. Sijaiskytkentä voidaan kuvata joko mekaanisena järjestelmänä tai virtapiirinä [6]. Tässä esitellään ainoastaan jälkimmäisen, sillä piiriteoria sellaisenaankin liittyy kaiuttimien suunnitteluun. Virtapiirin jännitettä u [V] vastaa nyt äänenpaine p [Pa] ja virtaa i [A] tilavuusnopeus U [m³/s] (merkitään myös joskus q). Impedanssia Z [Ω] vastaa akustinen impedanssi Z_a , sen yksikkö on akustinen ohmi, jota merkitään [Ω_A]. Akustinen impedanssi koostuu kahdesta osasta, samoin kuin sähköinen vastineensa. Resistanssia R , eli impedanssin reaalista osaa, vastaa akustinen resistanssi R_A . Imaginäärinen osa eli reaktanssi koostuu akustisesta induktanssista ja akustisesta kapasitanssista. Akustinen impedanssi on määritelty kaavassa (2.16).

$$Z_a = \frac{p}{U} = \frac{p}{vS} \quad [\Omega_A] \quad (2.16)$$

Fysikaalisesti akustinen impedanssi määritellään paineen suhteena tilavuusnopeuteen. Kaavasta (2.16) nähdään myös tilavuusnopeuden fysikaalinen määritelmä, joka on hiukkasnopeuden v tulo pinta-alan S läpi.

Akustinen resistanssi R_A voidaan jakaa kahteen eri tyyppiin. Se voi olla kaiutti-

nessa tapahtuva häviö, kun elementin mekaaninen liike muuttuu ääneksi. Toisaalta se voi olla esimerkiksi häviö refleksiputkessa, kun äänienergia muuttuu putkessa lämmöksi. Sen symboli piirikaaviossa on vastus. Kaavassa (2.17) [37] on esitetty ohuen, avoimen putken impedanssi. Sen reaaliosa on akustinen resistanssi ja imaginääriosaa akustinen reaktanssi. Kaavassa A on putken poikkipinta-ala, l_i on sen pituus, μ_d on ilman dynaaminen viskositeetti ($1,86 \cdot 10^{-5}$ poise) ja ρ on ilman tiheys.

$$Z_a = \frac{8\pi\mu_d l_i}{A^2} + j\omega \frac{4}{3} \frac{\rho l_i}{A} \quad (2.17)$$

Induktanssia L vastaa akustinen induktanssi L_A , kaava (2.18), jota kutsutaan myös akustiseksi massaksi M_A tai akustiseksi inertiaaksi. Tästä eteenpäin käytetään nimitystä akustinen massa. Komponentti kuvaa yleensä ilmamassaa, joka vastustaa tilavuusnopeuden muutosta, vastaavasti kuin sähköisessä piirissä induktanssi vastustaa virran muutosta. Piirikaaviossa akustisen massan symboli on kela.

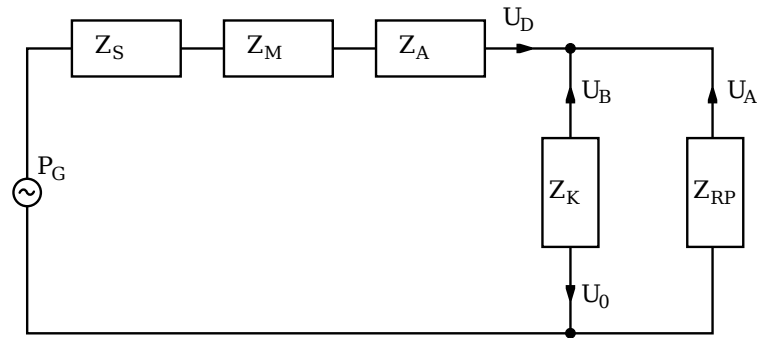
$$M_A = \frac{\rho l_i}{A} \quad [\text{kg/m}^4] \quad (2.18)$$

Viimeisenä määritellään akustinen kapasitanssi C_A , joka on analoginen sähköisen kapasitanssin C kanssa. Akustinen kapasitanssi kuvaa järjestelmässä joustavuutta, esimerkiksi kotelossa olevan ilman puristumista. Akustinen kapasitanssi on määritetty kaavassa (2.19) ja piirikaaviossa sen symbolina on kondensaattori. Kaavassa V on kaiutinkotelon tilavuus, ρ on ilman tiheys ja c äänennopeus ilmassa. Äänennopeus kaasussa määritellään kaavan (2.20) mukaan. Nyt γ on adiabaattinen vakio, p_k on kaasun paine ja ρ_k on kaasun tiheys.

$$C_A = \frac{V}{\rho c} \quad [\text{m}^5/\text{N}] \quad (2.19)$$

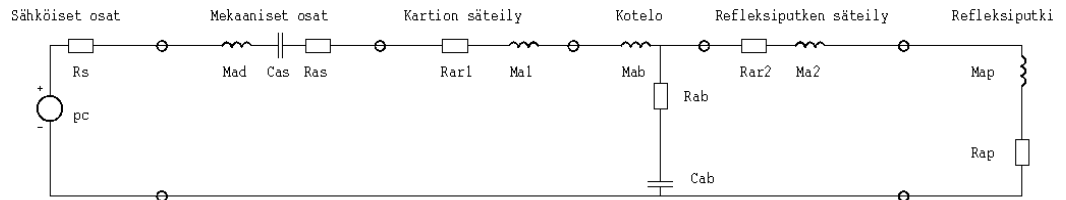
$$c = \sqrt{\frac{\gamma p_k}{\rho_k}} \quad (2.20)$$

Kuvassa 2.15 on esitetty yksinkertaistettu piirikaavio kaiuttimesta, jossa on refleksi-putki. Jännitelähde P_G kuvaa kaiuttimen äänenpainetta tuottavaa osaa eli kaiutinelementtiä ja se on määritetty kaavassa (2.21). Lähteen kanssa sarjassa on Z_S , joka kuvaa kaiutinelementin sähköistä impedanssia, Z_M on elementin mekaaninen impedanssi ja Z_A on elementin akustinen impedanssi. Elementin kanssa sarjassa on rinnankytkettyinä Z_K ja Z_{RP} . Ensimmäinen kuvaa kotelon ilmatilan impedanssia ja jälkimmäinen refleksi-putken impedanssia. Jos kaaviosta poistetaan komponentti Z_{RP} , vastaa kytkentä suljettua kaiutinkotelo. Piiriteoriassa sarjaankytketyissä komponenteissa kulkee sama virta. Samoin sarjaankytketyissä akustisissa piirielementeissä vaiuttaa sama tilavuusnopeus. Rinnankytkettyjen komponenttien yli on sama jännite, ja akustisessa piirissä niiden yli on sama äänenpaine.



Kuva 2.15: Yksinkertaistettu virtapiirianalogia refleksikotelokaiuttimelle

Kuvassa 2.16 on esitetty tarkempi piirianalogia kaiuttimelle. Kyseinen piiri vastaa refleksikotelokaiutinta, jossa on yksi elementti. Piiri on solmupisteiden avulla jaettu kuuteen eri osaan. Jokaisen osan yläpuolella on selite, mistä osasta on kyse. Seuraavissa kappaleissa on määritelty jokainen komponentti ja määritelmät ovat teoksesta [6], ellei toisin mainita. Kuva suhteuttaa hyvin eri osien vaikutuksen kokonaisuuteen, jota kaiuttimeksi kutsutaan. Kotelon vaikutus järjestelmään on määritelty kappaleessa 2.6.4.



Kuva 2.16: Kaiuttimen akustinen virtapiirianalogia [6]

2.6.1 Sähköisten osien määritelmät

Painelähde p_c vastaa äänenpaineen tuottamisesta akustisessa järjestelmässä. Sen vastine sähköisessä piirissä on jännitelähde, painelähdettä kuvataankin akustisessa piirissä jännitelähteen symbolilla. Painelähde on määritelty kaavassa (2.21), jossa e_g on vahvistimien tuottama jännite, B on magneettivuon tiheys puhekelassa, l_j on puhekelan johtimen pituus metreissä, R_g on vahvistimen sähköinen vastus, R_E on puhekelan sähköinen resistanssi ja S_D elementin tehollinen säteilypinta-ala. Se taas määritellään kaavassa (2.22), jossa V_0 on kotelon sisällä olevan ilmamassan tilavuus, P on kaiutinta ympäröivä ilmanpaine, ξ on elementin liikkuma matka tasapainotilasta ja p on

tästä liikkeen suuruudesta pääteltävä kaiutinta ympäröivän ilmanpaineen lisäys.

$$p_c = \frac{e_g B l_j}{(R_g + R_E) S_D} \quad (2.21)$$

$$S_D = \frac{V_0 p}{P \xi} \quad (2.22)$$

Kaiuttimen sähköisten osien kiintoimpedanssi näkyy akustisessa piirissä vastuksena R_S ja se on määritelty kaavassa 2.23. Kiintoimpedanssi voidaan mitata, kun elementti on lukittu liikkumattomaksi eikä sen liike vaikuta sähköisen piirin ominaisuuksiin.

$$R_S = \frac{B^2 l_j^2}{(R_g + R_E) S_D^2} \quad (2.23)$$

2.6.2 Mekaanisten osien impedanssi

Kartion ja puhekelan akustinen massa M_{AD} muodostaa järjestelmään akustisen induktanssin, joka on määritelty kaavassa (2.24). Kaavassa M_{MD} on kartion ja puhekelan massa ja S_D on elementin tehollinen säteilypinta-ala.

$$M_{AD} = \frac{M_{MD}}{S_D^2} \quad (2.24)$$

Kartion kiinnityksen joustavuus C_{AS} näkyy piirissä akustisena kapasitanssina. Se määritellään kaavassa (2.25). C_{MS} on kiinnityksen mekaaninen kokonaisjoustavuus.

$$C_{AS} = C_{MS} S_D^2 \quad (2.25)$$

Kartion kiinnitysten akustinen resistanssi R_{AS} kuvaa häviöitä, joita tulee, kun muunnetaan mekaanista liikettä ääneksi. Kiinnitysten akustinen resistanssi on määritelty kaavassa (2.26), jossa R_{MS} kiinnitysten mekaaninen resistanssi.

$$R_{AS} = \frac{R_{MS}}{S_D^2} \quad (2.26)$$

2.6.3 Kartion säteilyimpedanssi

Akustinen säteilyresistanssi kaiutinelementin etupuolella on R_{AR1} ja se määritellään kaavassa (2.27). Kaavassa f on taajuus, ρ on ilman tiheys ja c on äänennopeus. Akustinen säteilyresistanssi vastaa pitkässä putkessa olevan, ääntä tuottavan männän kokemaa resistanssia.

$$R_{AR1} = \frac{\pi f^2 \rho}{c} \quad (2.27)$$

M_{A1} on akustinen säteilymassa kaiutinelementin etupuolella ja se on määritelty kaavassa (2.28). Tämän muuttujan oletetaan vastaavan ilmamassaa, jota putkessa oleva, pinnaltaan tasainen, mäntä liikuttaa. Kaavassa a on männän säde. Käytännössä tämä luku on elementin säde. Yhdessä tämä ja edeltävä kaava määrittelevät kartion säteilyimpedanssin.

$$M_{A1} = \frac{8\rho}{3\pi a^2} \quad (2.28)$$

Nämä määritelmät pätevät vain aallonpituuksille, jotka ovat elementin halkaisijaa suurempia. Elementin säteilyimpedanssi voidaan yleisemmin approksimoida käyttäen äärettömän suureen levyyn kiinnitetyn männän säteilyimpedanssin määritelmää, kaava (2.29) [37]. Kaavassa k on aaltoluku, joka on aallonpituuden käänteisluku, ja r_{ms} on männän säde. J_1 on ensimmäisen kertaluvun Besselin funktio ja S_1 taas on ensimmäisen kertaluvun Struven funktio, jotka on tarkemmin määritelty esimerkiksi lähteessä [37].

$$Z_{ES} = \rho c \left(1 - \frac{J_1(2kr_{ms})}{kr_{ms}} + j \frac{S_1(2kr_{ms})}{kr_{ms}} \right) \quad (2.29)$$

2.6.4 Kaiutinkotelon sisällä olevan ilman impedanssi

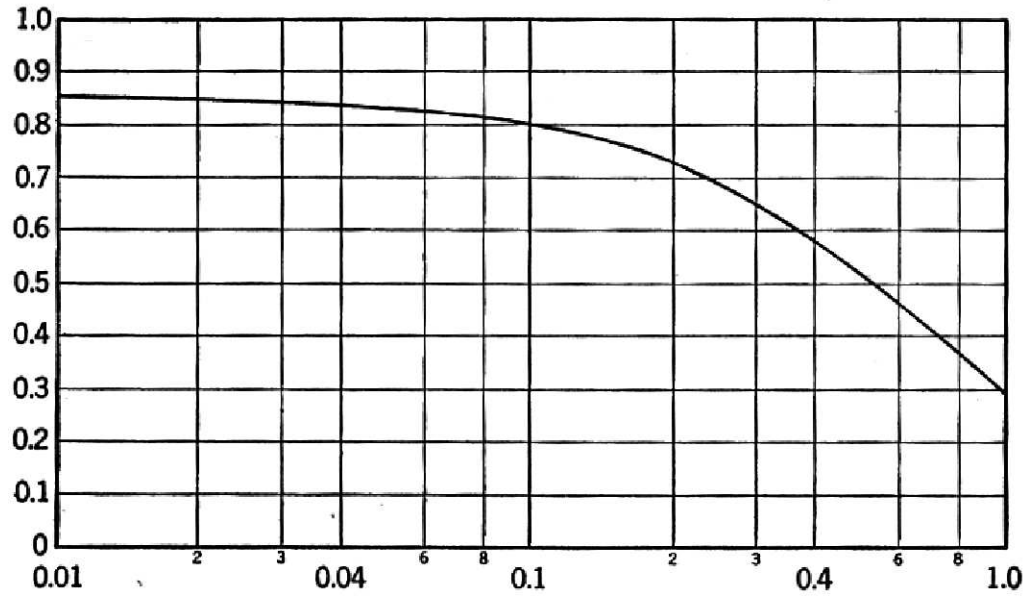
M_{AB} on kotelon sisällä olevan ilman akustinen massa. Se on määritelty kaavassa (2.30). Muuttuja a on elementin säde. B_K on massan reaktanssin korjaustermi, kaava (2.31), eli kaiutinelementin takana oleva takertunut ilmamassa. Se määräytyy kuvaajan 2.17 mukaan siten, että kaava (2.32) määrittää muuttujan x_t , joka kertoo x-akselin kohdan, josta muuttuja B_K arvo luetaan. Kaavassa S_D on elementin tehollinen säteilypinta-ala ja L_S seinämän pinta-ala, johon elementti on kiinnitetty.

$$M_{AB} = \frac{B_K \rho}{\pi a} \quad (2.30)$$

$$B_K = f(x_t) \quad (2.31)$$

$$x_t = (S_D / L_S^2) \quad (2.32)$$

Kotelon akustinen resistanssi R_{AB} kuvaa häviötä, joka tapahtuu, kun kotelo muuttaa äänienergian lämmöksi. Tämä resistanssi on määritelty kaavassa (2.33), jossa R_f on kotelon seinämään kiinnitetyn vaimennusmateriaalin virtausvastus ja S_M on sen pinta-ala. Jakajassa ω on kulmataajuus, V_B on kotelon tilavuus sisältäen vaimennusmateriaalin tilavuuden, V_M on vaimennusmateriaalin tilavuus ja γ on adiabaattinen vakio, jonka arvo ilmalle on 1,4.

Kuva 2.17: Kuvaaja muuttujan B_K määrittämiseksi. [6]

$$R_{AB} = \frac{R_f/3S_M}{\omega^2 C_{AB}^2 (R_f/3S_M)^2 + \left(1 + \frac{V_B}{\gamma V_M} + \frac{V_B^2}{\gamma V_M^2}\right)} \quad (2.33)$$

C_{AB} on kotelon joustavuus. Se kuvaa äänenpaineen vaikutuksesta joustavan kotelon tuottamaa kapasitanssia. Se on määritelty kaavassa (2.34), jossa P on ilmanpaine. Staattinen ilmanpaine on noin 10 N/m^2 .

$$C_{AB} = \frac{V_B}{\gamma P} \quad (2.34)$$

2.6.5 Refleksiputken säteilyimpedanssi

Refleksiputken säteilyresistanssi R_{AR2} ja akustinen massa M_{A2} vastaavat määritelmiltään kappaleessa (2.6.3) määriteltyjä muuttujia.

$$R_{AR2} = \frac{\pi f^2 \rho}{c} \quad (2.35)$$

$$M_{A2} = \frac{8\rho}{3\pi a^2} \quad (2.36)$$

2.6.6 Refleksiputken impedanssi

Refleksiputkessa olevan ilman akustinen massa M_{AP} on määritelty kaavassa (2.37), jossa C_{AS} on kartion kiinnityksen joustavuus, kaava (2.25). C_{AB} on kotelon joustavuus, kaava (2.34). M_{AD} on kartion ja puhekelan massa, kaava (2.24). M_{A1} on elementin etupuoolella oleva säteilymassa, kaava (2.28). M_{AB} on kaiutinkotelossa olevan ilman akustinen massa, kaava (2.30), ja M_{A2} refleksiputken edessä oleva säteilymassa, kaava (2.36). Kaava (2.37) pätee vain siinä tapauksessa, että refleksiputken ilmavirtaus on laminaarinen. Turbulentin virtauksen ollessa kyseessä tilanne olisi monimutkaisempi.

$$M_{AP} = \frac{C_{AS}}{C_{AB}}(M_{AD} + M_{A1} + M_{AB}) - M_{A2} \quad (2.37)$$

Refleksiputken akustinen resistanssi R_{AP} kuvaa sitä putkessa tapahtuvaa häviötä, joka muuttaa äänienergiaa lämmöksi. Refleksiputken akustinen resistanssi on määritelty kaavassa (2.38), jossa a_1 on putken säde, ω on kulmataajuus ja l' on refleksiputken pituus. Nyt μ on kinemaattinen viskositeettikerroin, joka on ilmalle noin $1,56 \cdot 10^{-5} [m^2/s]$.

$$R_{AP} = \frac{1}{\pi a_1^2} \rho \sqrt{2\omega\mu} \left(\frac{l'}{a} + (2) \right) \quad (2.38)$$

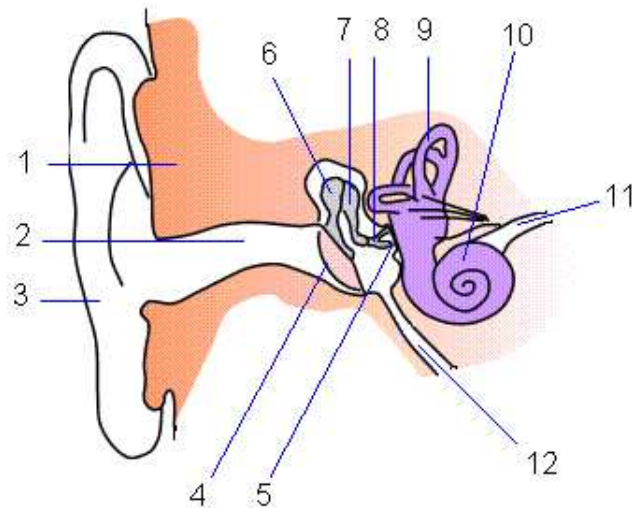
2.7 Kaiutinten ominaisuudet kuulon kannalta

Arvioitaessa kaiuttimia on hyvä tietää niiden tekniikasta ja tekniikan aiheuttamista rajoituksista. On myös hyvä tietää kuulosta ja kuulon toiminnasta, sillä ihmisen kuulolla on omat rajoituksensa, jotka tulee pitää mielessä kaiuttimia suunniteltaessa. Korvan anatomia esitetään kuvassa 2.18.

2.7.1 Kuulon toiminta

Ulkokorva

Ulkokorva koostuu korvalebdestä 3) ja korvakäytävästä 2). Tärykalvo 4) erottaa ulko- ja välikorvan. Korvalebden tehtävänä on kerätä erityisesti edestä tulevaa ääntä korvakäytävään. Toisaalta korvalehti vaimentaa pään takaa tulevia ääniä. Tämä on tärkeää suuntakuulon kannalta, sillä yleisesti suuntakuulo perustuu korvien välillä olevaan vaihe- ja tasoeroon, mutta takaa tulevien äänien vaimennus mahdollistaa niiden erottamisen suoraan edestä tulevista äänistä.



Kuva 2.18: Korvan anatomia [40] : 1) Kallo 2) Korvakäytävä 3) Korvalehti 4) Tärykalvo 5) Soikea ikkuna 6) Vasara 7) Alasin 8) Jalustin 9) Labyrintti 10) Simpukka 11) Kuulohermo 12) Eustachion putki

Välikorva

Välikorva on tärykalvon ja simpukan 10) välissä oleva ilman täyttämä onkalo. Välikorvassa sijaitsevat kuuloluut, jotka muuttavat aaltoliikkeenä tärykalvolle tulevan äänen mekaaniseksi liikkeeksi. Tärykalvossa on kiinni vasara 6), joka on kiinni alasinissa 7) ja alasin on kiinni jalustassa 8). Jalusta on kiinni soikeassa ikkunassa 5) ja jalustinlihaksessa. Soikea ikkuna on osa simpukkaa. Jalustalihaksen tarkoituksena on kuulon suojeleminen kuulovauriolta. Kova meteli laukaisee stapediuserfleksin, eli jalustinlihas supistuu. Tämä supistuminen vähentää kuuloluiden liikettä, vaimentaen näin äänen tasoa. Vaimennus tapahtuu lähinnä matalilla taajuuksilla. Välikorvassa on myös Eustachion putki 12), joka johtaa välikorvasta nieluun. Se tasaa paineen välikorvassa, esimerkiksi kun korvat ovat menneet lukkoon.

Välikorvan tehtävänä on impedanssisovitus ulko- ja sisäkorvan välillä. Ulkokorvaan saapuvalla äänellä on suuri hiukkasnopeus ja pieni paine. Kuuloluut muuttavat tämän pieneksi hiukkasnopeudeksi ja suureksi paineeksi. Tämä muunnos tehdään sisäkorvassa olevaa nestettä varten, sillä nesteen ominaisimpedanssi on noin 4000-kertainen ilman ominaisimpedanssiin verrattuna [20].

Sisäkorva

Viimeisenä ääreiskuulon osana on sisäkorva. Siellä, ohimoluun takana sijaitsee kuulolin eli simpukka. Vasaran mekaaninen liike saa soikean ikkunan värähtelemään. Simpukan sisällä oleva neste liikkuu soikean ikkunan vaikutuksesta. Tämä neste taas liikuttaa basilaarikalvoa, jossa ovat kiinni aistinsolut.

Basilaarikalvo on kerälle kiertyneenä simpukassa. Sen massa ja joustavuus muuttuvat etäisyyden mukaan. Lähellä kuuloluista, kutsuttakoon alkupääksi, se on kapea, kevyt ja jäykkä. Loppupäässä, eli kaukana kuuloluista, se on taas leveä, massiivinen ja joustava. Syy tähän on taajuusselektiivisyys, kalvon eri osat reagoivat eri taajuisille värähtelyille. Simpukan nesteen värähtely, tuottaa kulkuaallon basilaarikalvolle [13]. Mikäli kulkuaallon taajuus on korkea, basilaarikalvon alkupää resonoi sen vaikutuksesta ja ohitettuaan alkupään kulkuaalto vaimenee nopeasti. Jos kulkuaallon taajuus on matala, resonoi basilaarikalvon loppupää. Kulkuaalto, jonka taajuus on keskitaajuuksilla, tuottaa resonointia basilaarikalvon keskiosassa. Keskiosan ohitettuaan tällainen aalto vaimenee nopeasti.

Basilaarikalvon värähtely taivuttaa aistinsoluja, jotka taivutuksen vaikutuksesta lähettävät hermoimpulsseja kuulohermolle. Aistinsolujen värähtelyn amplitudi on verrannollinen lähetettyjen hermoimpulssien tiheyteen, joskaan ei suoraan [13]. Kuulohermo ohjaa impulssien sisältämän informaation eri tumakkeiden kautta kuuloaivokuorelle, joka lopulta käsittelee korvaan saapuneen ääni-informaation.

2.7.2 Magnitudivastevirheiden havaitseminen

Magnitudivaste, jota myös taajuusvasteeksi kutsutaan, kuvaa mitattavan kohteen taajuusominaisuuksia, eli voimistaako vai vaimentaako se tiettyä taajuutta. Äänentoistolaitteistoa mitattaessa sekä x-akseli, että y-akseli kuvataan logaritmisella asteikolla, koska se vastaa paremmin kuulon toimintaa kuin lineaarinenasteikko. Ihmisen kuulo pystyy erottamaan noin yhden desibelin suuruisen eron äänipainetasossa, esimerkiksi vertailtaessa peräkkäin esitettyjä ääniä, joista toinen on desibelin verran voimakkaampi.

2.7.3 Ryhmäviivevirheiden havaitseminen

Kaiuttimen magnitudivasteen lisäksi voidaan mitata vaihevaste. Vaihevaste määrittelee sen, muuttaako kaiutin tietyn taajuuden vaihetta vai ei. Vaiheen muutos voi olla positiivinen tai negatiivinen. Derivoimalla vaihevaste saadaan ryhmäviive. Vaihevaste kuvaa tietyn taajuuden viivästymistä ja ryhmäviive kuvaa signaalin modulaation viivästymistä [20]. Ryhmäviive tuottaa häiriöitä etenkin transienttiääniin. Suodattimissa

ryhmäviive on kaikkein suurin rajataajuuden läheisyydessä. Ryhmäviiveen häiritsevyys johtuu muunmuassa transienttiäänten pitkittymisestä. Nopea, esimerkiksi iskuääni, jää ryhmäviiveen vaikutuksesta soimaan. Ryhmäviiveen ollessa alle kaksi millisekuntia, sitä ei havaita juuri missään olosuhteissa. Musiikkia kuunnellessa ryhmäviive voi olla 3–5 millisekuntia ilman häiritsevyyttä.

2.7.4 Särön havaitseminen

Äänentoistossa särö tarkoittaa epälineaarista vääristymää. Särö voi tuottaa alkupe-
räiseen signaaliin uusia taajuuskomponentteja. Särö voi syntyä esimerkiksi vahvistimessa, joka ei kykene tuottamaan signaalin alkuperäisen kaltaisena, vaan riikkoo sen aaltomuodon, esimerkiksi sinisignaalista tulee kantiaalto.

Harmoninen särö tuottaa siniääneeseen uusia taajuuskomponentteja, kyseisen ään-
neksen harmoniset. Harmoninen särö ei yleensä ole kovinkaan ongelmallinen, sillä luonnossa esiintyvät signaalit ovat yleensä harmonisia [20]. Häiritsevä harmoninen särö koetaan, jos se tuottaa voimakkaita, korkeataajuisia komponentteja. Harmoni-
nen särö d voidaan määritellä prosentteina, kuten kaavassa (2.39), on tehty. Kaavassa oletetaan, että signaali koostuu perustaajuudesta, jonka amplitudi on $A_f(1)$, ja sen i:nnestä harmonisista, joiden amplitudit ovat $A_f(i)$.

$$d = 100\% \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^N A_f(i)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N A_f(i)^2}} \quad (2.39)$$

Harmoninen särö on siis särökomponenttien tehollisarvon suhde koko signaalin tehollisarvoon. Kokonaisharmoninen särö (THD), sisältää kaikki signaalia vääristävät komponentit, esimerkiksi kohina ja aliharmoniset.

Harmonista säröä haitallisempaa on keskeismodulaatiosärö (IM). Se muodostuu tilanteessa, jossa ääneksiä on useampi kuin yksi. Näiden ääneksien ja niiden harmonisten summaukset ja erotukset tuottavat häiritseviä osääniä. Osääniä häiritsevyys johtuu niiden epäharmonisuudesta.

Luku 3

Kaiutinmateriaalien mittaus ja vertailu

Tässä kappaleessa on tarkoitus selvittää, mikä kolmesta tutkimukseen valitusta kivistä on paras mahdollinen kaiutinmateriaali. Valinta on tehtävä Auroran, Balmoralin ja Varpaisjärven mustan välillä. Kaiuttimen valmistusprosessin kannalta kivissä ei ole eroja, vaan kaikkien työstäminen on yhtä vaativaa. Myöskään hinnoissa ei ole huomattavia eroja. Ulkonäkönsä puolesta kivet eroavat toisistaan: Aurora ja Balmoral ovat molemmat punamustia ja Varpaisjärven musta taas on nimensä mukaan musta.

Kaiutinmateriaalin kolme tärkeää ominaisuutta ovat suuri massa, kyky vaimentaa värähtelyä tehokkaasti sekä suuri jäykkyys. Massaan vaikuttaa luonnollisesti materiaalin tiheys. Värähtelyn vaimentamista tutkittiin moodianalyysin avulla. Vertailun vuoksi mitattiin myös perinteisten kaiutinmateriaalien, eli eri puulevyjen vibroakustisia ominaisuuksia.

3.1 Prototyypikaiuttimen valmistuksesta

Prototyypikaiuttimen valmistustekniikka on kivilajista riippumaton. Pääpiirteissään prototyypin valmistus tapahtuu seuraavasti: ensin prototyypikaiuttimen levyt mitataan ja niistä tehdään AutoCad-mallit. Tämän jälkeen koneistuskeskus sahaa 20-millisestä kivisoirosta halutunmittaiset levyt. Sen jälkeen levyihin porataan tarvittavat reiät ja kulmat pyöristetään jyrsimällä. Lopuksi levyjen pinnat hiotaan kiiltäviksi.

Kaiutinkotelon valmistaminen kivistä on ymmärrettävästi kalliimpaa kuin saman kotelon tekeminen puusta. Tavanomaisen kaiutinkotelon voi tehdä hyvinkin yksinkertaisilla työkaluilla vaikka omassa autotallissa. Kiven työstämisessä käytettävissä työkaluissa, kuten pyöröterässä, porassa tai jyrsimessä, käytetään timanttiteriä ja onkin

selvää, että tämänkaltaiset työkalut ovat kalliita. Kiven työstäminen on myös hitaampaa kuin puun ja kivilevyjen käsittely on huomattavasti hankalampaa suuremman painon vuoksi. Tarvittavien työkalujen ja hankalamman käsittelyn takia prototyyppikaittimien valmistamiseen vaaditaan vähintäänkin pieni kivipaja. Kivikoteloiden tuottaminen suuremmassa mittakaavassa vaatii koneistuskeskuksen, jotta tuotantonopeus pysyy järkevänä.

3.2 Mitattavat kivimateriaalit

3.2.1 Aurora

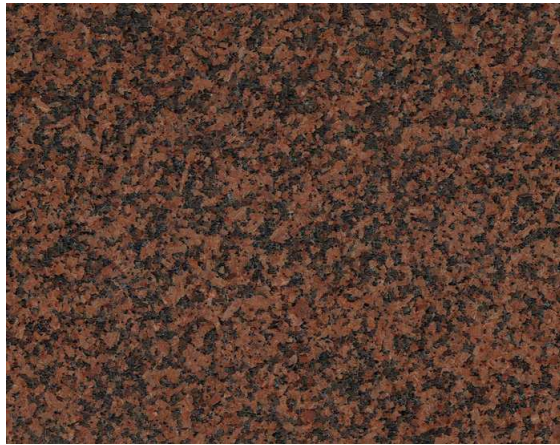
Aurora on migmatiitti eli seoskivi. Eli se koostuu useammasta kivilajista. Migmatiitit muodostuvat äärimmäisissä lämpötiloissa, joissa osa kivimateriaaleista sulaa ja osa pysyy kiinteänä [39]. Auroraa louhitaan Mäntsälässä, siksi sitä kutsutaan myös nimellä Mäntsälän punainen. Auroran tiheys on 2680 kg/m^3 .



Kuva 3.1: Aurora kiiltävällä pintakäsittelyllä [30]

3.2.2 Balmoral

Balmoral on laadultaan graniitti. Graniitti on magmakivi, joka on kiteytynyt hitaasti syvällä maankuoressa [23]. Graniitti on maailman yleisin syväkivilaji [26]. Balmoralia louhitaan Lohilahdella, Sulkavalassa ja Taivassalossa. Se tunnetaan myös nimellä Taivassalon punainen graniitti ja sen tiheys on 2640 kg/m^3 .



Kuva 3.2: Balmoral kiiltävällä pintakäsittelyllä [30]

3.2.3 Varpaisjärven musta

Varpaisjärven musta on diabaasi. Diabaasi on myös magmakivi, mutta toisin kuin Balmoral se on vulkaaninen pintakivi, eli se on muodostunut magman purkautuessa maanpinnalle, esimerkiksi tulivuorenpurkauksessa tai maanjäristyksen yhteydessä [26]. Varpaisjärven mustaa louhitaan Varpaisjärvellä ja sen tiheys on 3080 kg/m^3



Kuva 3.3: Varpaisjärven musta kiiltävällä pintakäsittelyllä [30]

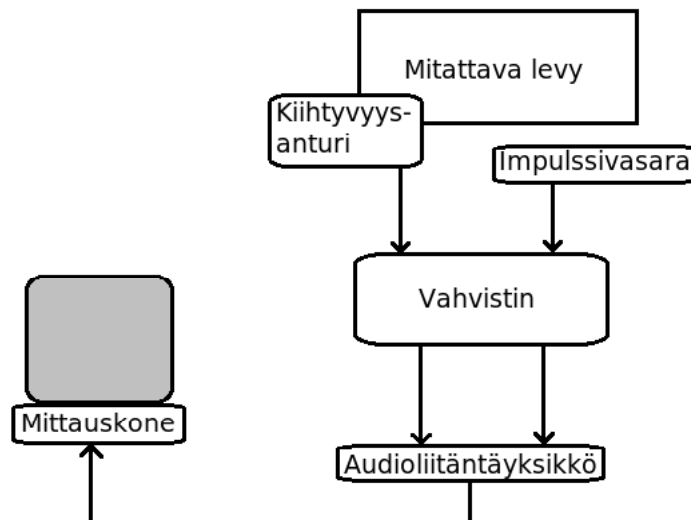
3.3 Mittausjärjestelyt

Eri materiaaleja mitattiin akustiikan laboratorion mittaustietokoneella. Levyn kulmaan kiinnitettiin kiihtyvyyssanturi, kappale 3.3.2, joka mittasi impulssivasaralla, kap-

pale 3.5, kevyesti kopauttamalla tuotetun vasteen. Mittausohjelmalla käytettiin Audacityä [3]. Herätteestä ja vasteesta laskettiin materiaalin värähtelyominaisuudet. Levyjä vasaroitiin kevyesti joka kulmasta ja jokaisella materiaalilla mooditaajuudet pysyivät samoina kulmasta riippumatta, mikä oli toki tarkoituskin. Levyjen ripustusta pohdittiin pitkään. Tarkoituksena oli saada teline, joka mahdollisimman vähän vaimentaisi levyn värähtelyä, mutta olisi kuitenkin helposti toteutettavissa. Lopulta mitaukset suoritettiin siten, että levyä pidettiin vaakatasossa neljän sormenpään varassa sitä vasaroitaessa. Sormet oli aseteltu niin, että ne vaimensivat mahdollisimman vähän levyn värähtelyä. Tämä oli riittävän hyvä ripustus, sillä mooditaajuudet ja niiden ominaisuudet oli helposti laskettavissa mittaustuloksista. Mittauksessa käytetyt laitteet on lueteltu taulukossa 3.1 ja kytkennät on esitetty kuvassa 3.4. Mittautulokset käydään läpi kappaleessa 3.4.

Taulukko 3.1: Materiaalien mittauksessa käytetyt työvälineet

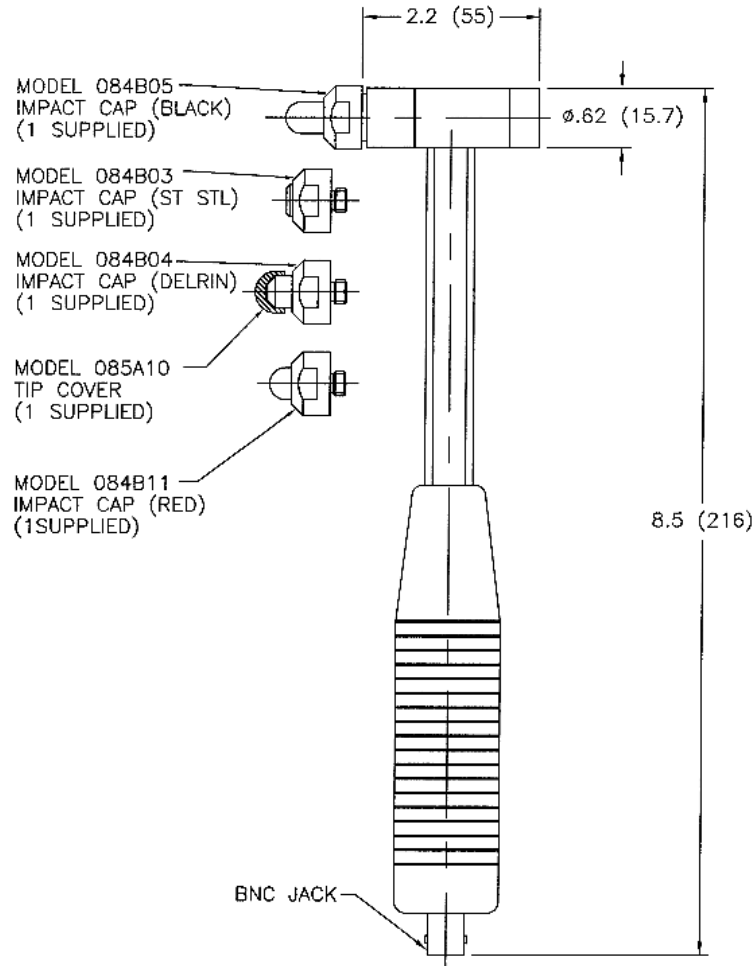
Tietokone	Power Macintosh G4
Mittausohjelma	Audacity 1.3.3 (Beta)
Audioliitäntäyksikkö	PreSonus FirePod
ICP-vahvistin	CMT Engineering OY
Impulssivasara	PCB Piezotronics 086C01
Kiihtyvyyssanturi	PCB Piezotronics 333A32



Kuva 3.4: Materiaalin mittauksessa käytetyt kytkennät

3.3.1 Impulssivasara

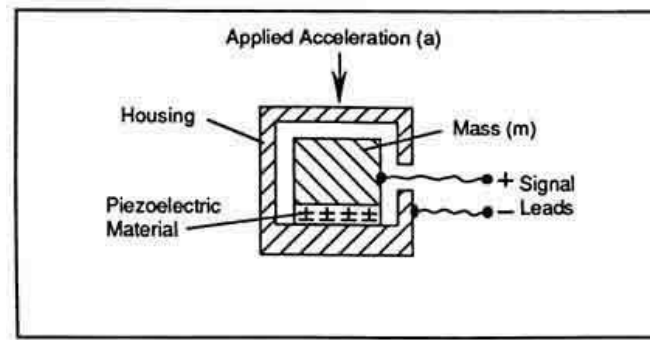
Impulssivasaraa käytetään nimensä mukaisesti impulssin tuottamiseen. Impulssivasara on esitetty kuvassa 3.5. Se koostuu varresta, kärjestä sekä mahdollisesta lisäpainosta. Vasaran kärjessä sijaitsee voimamittari (pietsoanturi), jonka mittaama voima pitäisi olla yhtä suuri kuin vasaran kohteeseensa tuottama [14]. Voiman tason määrittäminen lyömällä on melko hankalaa, koska ei ole tarvetta erityisen kovalle iskulle. Voima kuitenkin määräytyy vasaran massan ja iskun nopeuden perusteella. Lisäpainolla voidaan hallita vasaran massa ja käyttäjän on melko helppoa säädellä lyönnin nopeutta. Vasaran kärjellä voidaan hallita impulssin pituutta: pehmeä kärki tuottaa pitemmän impulssin kuin kova kärki. Mitä lyhyempi impulssi, sitä suuremman taajuusalueen se kattaa.



Kuva 3.5: PCB Piezotronics 086C01 impulssivasara [28]

3.3.2 Kiihtyvyysanturi

Vasaran tuottama vaste mitataan kiihtyvyysanturilla, kuva 3.6, joka kiinnitetään mitattavaan kohteeseen esimerkiksi vahalla. Sen sisällä on massajousjärjestelmä, jossa anturin runkoon on kiinnitetty pietsosähköinen kide, joka toimii jousena. Tähän kiinteeseen on kiinnitetty massa, joka pystyy liikkumaan vain yhden akselin suuntaisesti. Kiihtyvyysanturin liikahtaessa tämä massa joko venyttää tai puristaa kasaan kidettä, jonka yli vaikuttava jännite muuttuu. Jännitteen muutoksista voidaan päätellä mitattavan kohteen käyttäytyminen kiihtyvyyden suhteen.



Kuva 3.6: Kiihtyvyysanturin toimintaperiaate [27]

3.4 Mittaustulokset ja niiden analysointi

Taulukossa 3.2 on esitelty eri kivilaatuojen mittaustulokset ja taulukossa 3.3 on esitetty vertailuna perinteisten kaiutinkotelomateriaalien mittaustulokset. Jokaiselle materiaalille etsittiin mooditaajuudet ja jokaiselle taajuudelle laskettiin vaimenemisaika, kappale 3.4.2, ja Q-arvo, kappale 3.4.3.

Jotta voitiin laskea vaimenemisaikat ja Q-arvot piti, ensin selvittää levyjen mooditaajuudet. Ne saatiin käyttämällä Pronyn menetelmää, kappale 3.4.1. Tätä varten piti ensin laskea levyn kiihtyvyyden impulssivaste. Helpoiten tämä onnistui tekemällä ensin diskreetti Fourier-muunnos \mathcal{F}^{-1} , kaava (3.1), herätteelle $x[n]$ ja vasteelle $y[n]$. Jakamalla vaste herätteellä saatiin levyn kiihtyvyysvaste. Tälle kiihtyvyysvasteelle tehtiin diskreetti käänteis-Fourier-muunnos, kaava (3.2), ja näin saatiin levyn kiihtyvyyden impulssivaste. Koko laskenta impulssivasteelle $h[n]$ on esitetty kaavassa (3.3).

$$X_k = \mathcal{F}(x_n) = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-\frac{2\pi i}{N} kn} \quad k = 0, \dots, N-1 \quad (3.1)$$

$$x_n = \mathcal{F}^{-1}(X_k) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{\frac{2\pi i}{N} kn} \quad n = 0, \dots, N-1 \quad (3.2)$$

$$h[n] = \mathcal{F}^{-1} \left(\frac{\mathcal{F}(y[n])}{\mathcal{F}(x[n])} \right) \quad (3.3)$$

3.4.1 Pronyn menetelmä

Mooditaajudet etsittiin käyttämällä Matlab-ohjelmassa Pronyn menetelmää [22], joka sovittaa annettuun impulssivasteeseen parametriseen mallin. Pronyn menetelmä hakee iteratiivisesti pienimmän neliövirheen sovituksen annettuun vasteeseen. Algoritmissa määritellään erikseen osoittajan ja nimittäjän asteluvut. Suodattimen yleinen siirtok funktio on esitetty kaavassa (3.4).

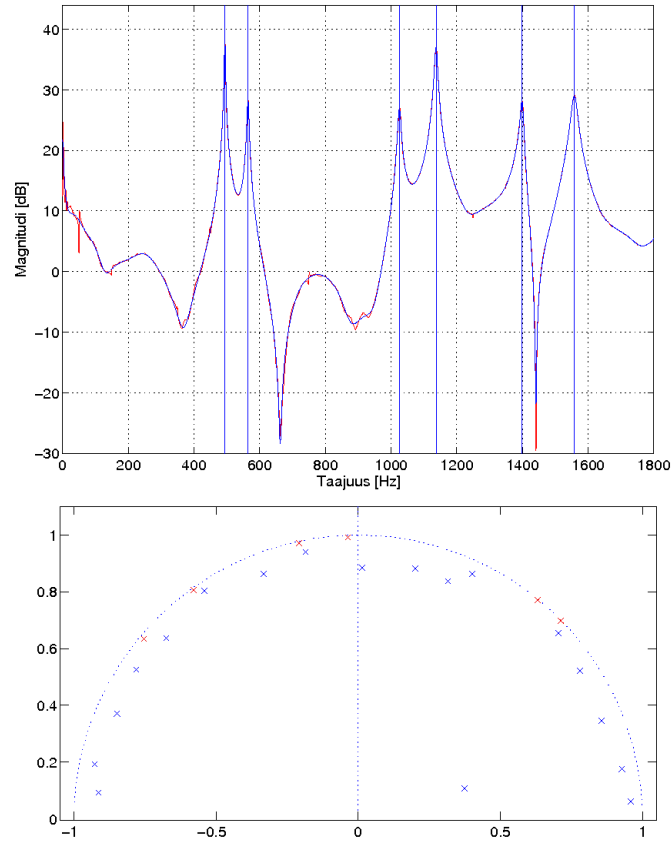
$$H(z) = \frac{B(z)}{A(z)} = \frac{b(1) + b(2)z^{-1} + \dots + b(n+1)z^{-n}}{a(1) + a(2)z^{-1} + \dots + a(n+1)z^{-m}} \quad (3.4)$$

Astelukujen ollessa riittävän korkeita Pronyn menetelmällä saadun suodattimen taajuusvaste noudatteli tarkasti kivilevyn kiihtyvyyssvastetta. Nyt voitiin tarkastella saadun suodattimen siirtok funktiota. Nimittäjä polynomin kompleksikonjugaatti-juuret, eli suodattimen navat, vastaavat taajuusvasteessa moodipiikkejä. Suodattimen napa-nolla-kuviota tarkastelemalla valittiin navat, joiden etäisyys yksikköympyrästä oli riittävän pieni ja näin ollen Q -arvo riittävän suuri. Taajuusvasteessa navan etäisyys yksikköympyrästä määrittää kyseisellä taajuudella olevan spektriipiikin voimakkuuden, mitä lähempänä sitä voimakkaampi spektriipikki. Näin saatiin valittua taajuusvasteesta voimakkaimmat piikit ja vastaavat mooditaajuuden parametrit. Matlab-koodi on esitetty liitteessä A.2.1.

Kuvassa 3.7 nähdään Varpaisjärven mustan kiihtyvyyssvaste sekä Pronyn menetelmällä saadun suodattimen napa-nolla-kuvio. Mitattavan olevan levyn mitat ovat $30 \times 21 \times 1$ senttimeriä. Napa-nolla-kuviosta on poistettu kuvan selkeyttämiseksi nollat. Mooditaajuuksia edustavat navat ovat punaisia. Tässä tapauksessa mooditaajudet ovat kahden ryppäissä kiihtyvyyssvasteessa, samoin navat ovat kahden ryhmässä napa-nolla-kuviossa. Tarkastellaan napa-nolla-kuviota vastapäivään kaarta pitkin. Ensimmäinen vastaantuleva punainen napa vastaa moodia taajuudella 494 hertsiä. Toinen napa tuottaa moodipiikin taajuudella 565 hertsiä, kolmas taas taajuudella 1025 hertsiä.

3.4.2 Vaimenemisaika

Vaimenemisaika, jota kirjallisuudessa merkitään T_{60} , tarkoittaa aikaa, joka kuluu siihen, että signaali on vaimentunut alkuperäisestä 60 dB:n verran. Sen laskentaan käy-



Kuva 3.7: Varpaisjärven mustan kiihtyvyyssvaste ja napa-nolla-kuvio

tetty Matlab-koodin on esitetty liitteessä A.2.2. Sali- ja huoneakustiikassa sitä kutsutaan nimellä jälkikaiunta-aika. Mitä lyhyempi vaimenemisaika on, sitä nopeammin resonointi vaimenee. Aiemmin mainitulla Pronyn menetelmällä saatujen napojen avulla laskettiin vaimenemisaika jokaiselle moodille kaavan (3.5) mukaan. Kaavassa r_s on navan säde, eli sen etäisyys origosta ja f_s on näytteenottotaajuus. Navan säde kertoo moodin voimakkuuden. Mitä lähempänä se on yksikköympyrää, sitä suurempi amplitudi moodilla on.

$$T_{60} = \frac{\ln 0,001}{\ln (r_s \cdot f_s)} \quad (3.5)$$

3.4.3 Q-arvo

Q-arvo kertoo mooditaajuudella olevan spektriipiikin muodon: mitä suurempi arvo, sitä terävämpi spektriipiikki on. Q-arvo lasketaan kaavan (3.6) mukaan, jossa f_N on mooditaajuus ja B_N on -3 desibelin kaistanleveys, joka on määritelty kaavassa (3.7).

$$Q = \frac{f_N}{B_N} \quad (3.6)$$

$$B_N = \frac{f_s \ln r_s}{-2\pi} \quad (3.7)$$

Q-arvo on siis mooditaajuuden suhde -3 desibelin kaistanleveyteen. Jos energia vähe-
nee kolme desibeliä alkuperäisestä, on energian määrä pudonnut puoleen alkuperäi-
sestä. Q-arvon laskentaan käytetty Matlab-koodi on esitetty liitteessä [A.2.3](#).

3.4.4 Kivilevyjen mittaustulokset

Taulukossa [3.2](#) on lueteltu mittaustulokset eri kivilevyille.

Taulukko 3.2: Kivilevyjen mittaustulokset

Aurora		
Taajuus	Vaimenemisaika (T_{60}) [s]	Q-arvo
550	0,8496	423
604	0,3910	215
1250	0,2099	239
1274	0,2890	335
1597	0,2881	419
1737	0,1011	160
keskiarvot	0,3548	299
Balmoral		
464	0,3377	142
469	0,7816	333
1034	0,0683	64
1042	0,1133	107
1290	0,0841	99
keskiarvot	0,2770	149
Varpaisjärven musta		
494	0,7862	353
565	0,3869	199
1025	0,2314	216
1137	0,2508	259
1399	0,2219	283
1558	0,1121	159
keskiarvot	0,3316	245

Jokaiselle levyille on myös laskettu keskiarvot vaimenemisajalle ja Q-arvolle ver-
tailun helpottamiseksi. Kuvassa [3.8](#) on esitetty eri kivilevyjen moodit kiihtyvyyssas-

teiden avulla. Mooditaajuuksien kohdalle on piirretty pystysuora viiva helpottamaan kuvaajan tulkitsemista. Kuvaajissa punainen on alkuperäinen signaali ja sininen on Pronyn menetelmällä laskettu malli. Mielenkiintoista on Balmoralin kohdalla olevat kaksinkertaiset moodit, eli hyvin lähekkäin sijaitsevat moodit. Nämä moodit sijaitsevat väleillä 460 - 470 Hz ja 1030 - 1045 Hz. Kaksinkertaisia moodeja ei voi havaita alkuperäistä kuvaajaa silmämääräisesti tutkimalla, vaan ne on löydetty jo mainittua Pronyn menetelmää käyttämällä. Täydellä varmuudella ei voida sanoa, että kyseisissä kohdissa olisi todella kaksinkertaiset moodit. Kyseessä saattaa olla Pronyn menetelmän sovituksista johtuva virhe.

Taulukon 3.4.4 keskiarvoista voi helposti nähdä, että Balmoralilla on kahta muuta pienemmät Q-arvot ja lyhyemmät vaimenemisajat. Tämän vaikutuksen voi huomata myös kuvassa 3.8, Balmoralin moodipiikit ovat noin kymmenen desibeliä vaimeammat kuin Auroran tai Varpaisjärven mustan. Balmoralin moodit eivät myöskään ole yhtä terävät, kuin kahdella muulla kivellä. Kivien välillä olevien erojen vaikutusta lopputulokseen on kuitenkin melko mahdotonta etukäteen ennustaa. Tulosten samankaltaisuus tarkoittaa kuitenkin sitä, että kivet ovat vibroakustisilta ominaisuuksiltaan hyvin samankaltaiset. Jos jokaisesta kivityypistä tehtäisiin prototyyppi, niiden välillä ei oletettavasti olisi järin suuria eroja.

3.4.5 Puulevyjen mittaustulokset

Puulevyjen mittaustulokset on esitetty taulukossa 3.3. Q-arvot ja vaimenemisajat ovat keskenään melko samankaltaisia. Mittaustulosten perusteella parhaimmilla kaiutinkotelomateriaaleilta vaikuttavat kuusi- ja lastulevy, sillä niissä on nopeimmat vaimenemisajat sekä pienimmät Q-arvot. Useimmat kaupalliset kaiuttimet tehdään kuitenkin MDF-levystä, vaikka se ei vaimenemisaikojen tai Q-arvojen perusteella olekaan paras valinta.

Kuvassa 3.9 on esitetty muutamien puumateriaalien kiihtyvyyssvasteet. Pystyviivoilla on merkitty Pronyn menetelmällä löydetty mooditaajuudet. Suurin ero kivimateriaaleihin on spektripiikeissä, jotka eivät ole yhtä terävät kuin kivillä. Tämä ilmenee myös Q-arvoista, jotka ovat keskimäärin pienemmät.

3.5 Prototyypin materiaalin valinta

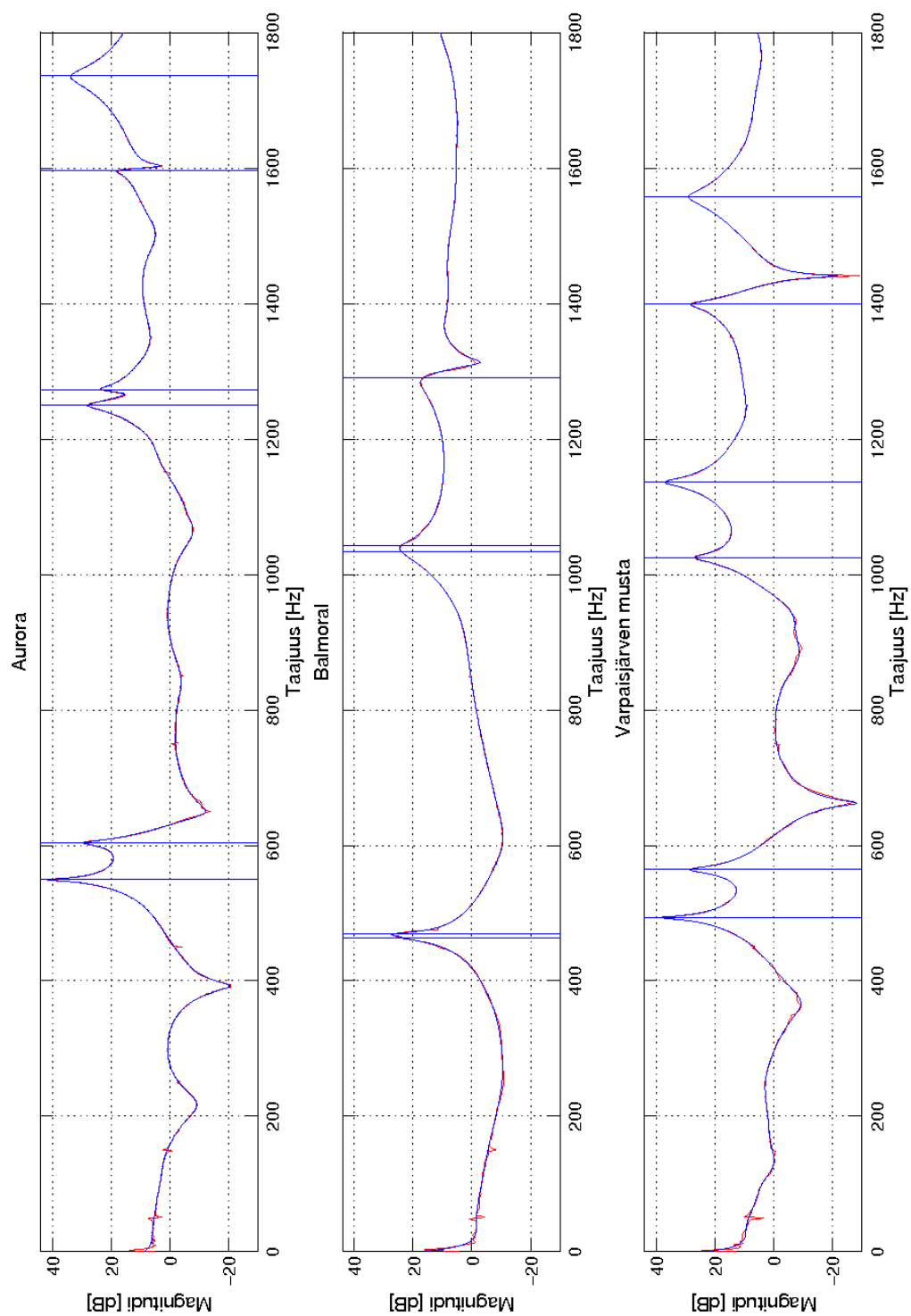
Kuten kappaleessa 3.4.5 mainittiin, parasta kaiutinkotelomateriaalia ei voi valita pelkästään Q-arvojen ja vaimenemisaikojen perusteella. Moodianalyysistä ei siis ollut ratkaisevaa apua materiaalinvalintapäätöstä tehtäessä. Päätös tehtiin kahden ominaisuuden perusteella: jäykkyuden ja tiheyden. Jäykkyys on materiaalin kyky vastustaa

Taulukko 3.3: Puulevyjen mittaustulokset

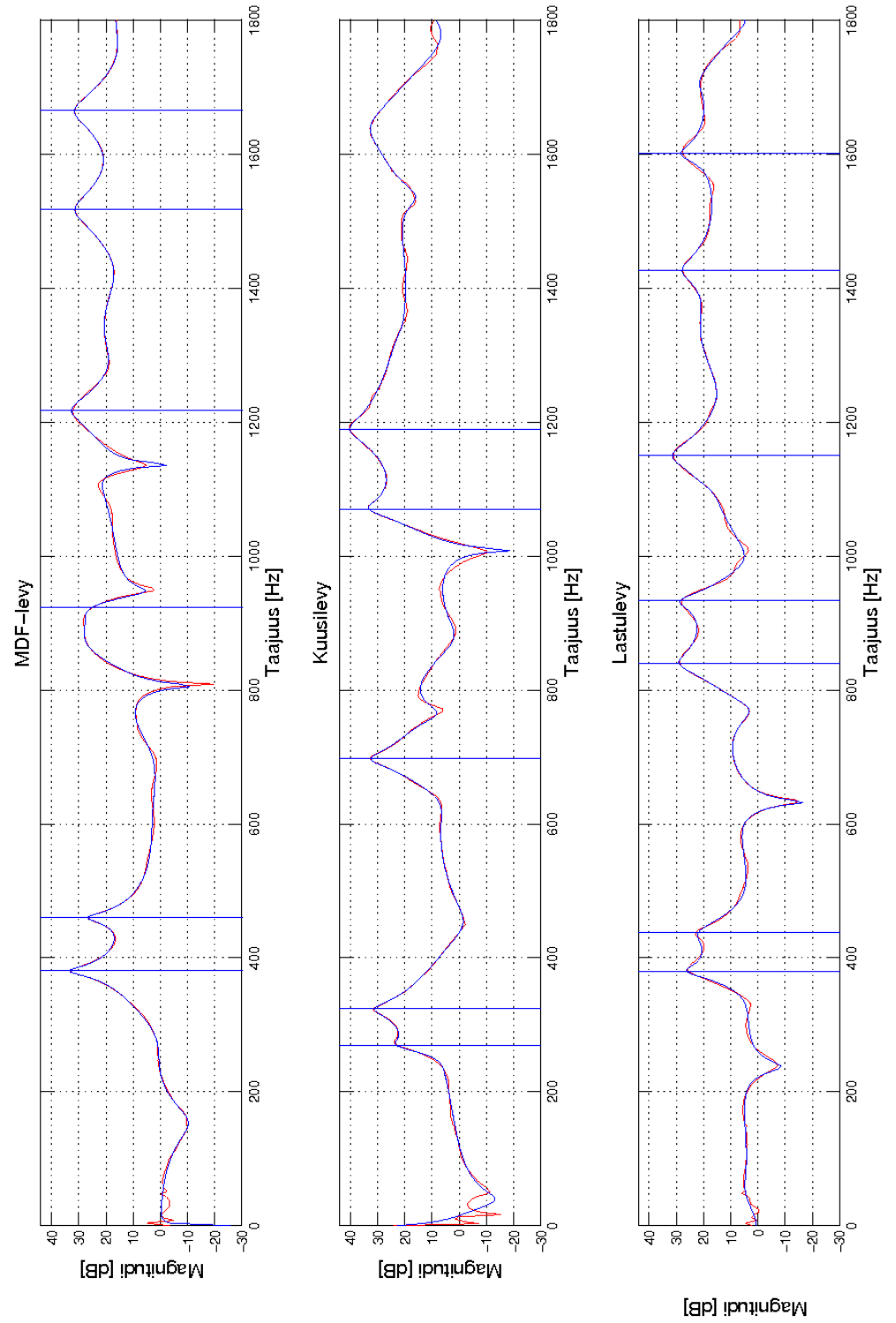
Kuusilevy		
Taajuus	Vaimenemisaika (T_{60}) [s]	Q-arvo
266	0,0931	23
325	0,1087	32
698	0,1585	101
1068	0,1442	140
1191	0,0787	85
1642	0,0426	64
keskiarvot	0,0965	76
Lastulevy		
379	0,1684	58
438	0,0636	25
839	0,0833	64
934	0,1176	100
1148	0,0725	79
1427	0,0755	98
1602	0,0914	133
keskiarvot	0,0964	80
MDF-levy		
380	0,2328	80
464	0,0743	31
882	0,1126	90
1210	0,1163	128
1510	0,0699	96
1669	0,1012	154
keskiarvot	0,1178	97
Vanerilevy		
255	0,4821	112
539	0,2013	99
712	0,1291	84
1627	0,0651	96
keskiarvot	0,2194	98

muodonmuutosta. Eri kivimateriaalien välillä ei jäykkyydessä ollut juurikaan eroa. Tiheyksissä sen sijaan oli huomattavia eroja. Mitä painavammat seinämät kaiuttimessa on, sitä enemmän energiaa niiden liikuttaminen vaatii. Siksi materiaaliksi valittiin Varpaisjärven musta, kappale 3.2.3, sillä sen tiheys on muita suurempi. Materiaalien välillä ei ollut juurikaan eroa niiden hinnassa tai valmistettavuudessa. Ulkonäössä sen

sijaan oli ja musta on aina turvallinen valinta kaiuttimen väriksi. Kaiuttimen ulkonäön on havaittu vaikuttavan kuuntelukokemukseen. Kaiuttimen havaittu koko vaikuttaa äänenlaatuun siten että pienempi kaiutin arvioidaan huonommaksi kuin isompi vertailukappale. Myös kotelon värin ja materiaalin on havaittu vaikuttavan kuuntelutuloksiin. Suuri osa kuluttajille myytävistä kaiuttimista onkin mustia tai kotelon pinnassa on pyritty säilyttämään puun luonnolliset syyt, esimerkiksi petsaamalla.



Kuva 3.8: Kivilevyjen kiihtyvyyssvasteet



Kuva 3.9: Puulevyjen kiihtyvyyssvasteet

Luku 4

Mallikaiutin

4.1 Esittely

Aikaisemmissa kappaleissa on käyty läpi kaiuttimen teoriaa sekä kotelomateriaalin vaikutusta äänentoistoon. Tässä kappaleessa esitellään mallikaiutin, jonka pohjalta prototyyppikaiutin valmistetaan. Sen sijaan, että mallikaiutin tehtäisiin alusta alkaen itse, valittiin mallikaiuttimeksi hyviä arvosteluja kerännyt Tannoy Mercury F1, joka on jalustalle tai hyllyyn sijoitettava kaiutin. Valmistajan mukaan kaiutinparia voidaan käyttää pääkaiuttimina tai kotiteatterijärjestelmän takakaiuttimina. Kaiuttimen tekniset tiedot on esitetty taulukossa [4.1](#)

Taulukko 4.1: Kaiuttimen tekniset ominaisuudet.

Valmistaja	Tannoy
Malli	Mercury F1
Kotelotyyppi:	Bassorefleksi
Kotelomateriaali:	15 mm lastulevy, tuettu sisäisesti
Etulevy:	19 mm MDF-levy
Impedanssi:	8 Ω
Valmistajan ilmoittama taajuusvaste:	55 - 20 000 Hz
Lyhytaikainen tehonkesto:	100 W
Jatkuva tehonkesto:	50 W RMS
Herkkyys:	87 dB
Ulkomitat - <i>korkeus</i> \times <i>leveys</i> \times <i>syvyys</i> mm	300 \times 170 \times 220
Tilavuus:	6,6 litraa
Paino:	4 kg



Kuva 4.1: Mallikaiutin Tannoy Mercury F1

4.2 Taajuusvaste

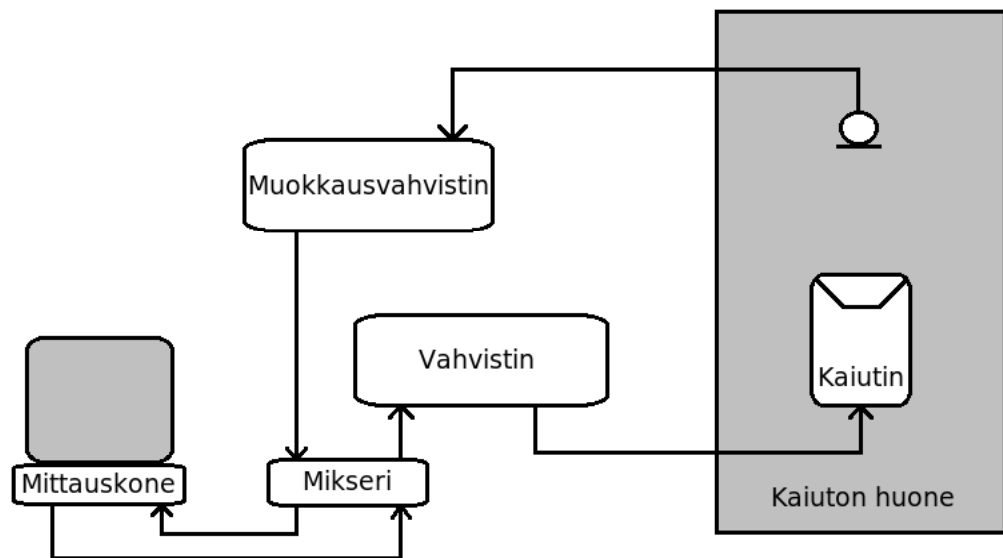
4.2.1 Mittausjärjestelyt

Mallikaiuttimen taajuusvaste mitattiin Akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratorion isossa kaiuttomassa huoneessa. Taajuusvasteessa yhdistettiin lähi- ja kaukokenttien mittaustulokset mahdollisimman tarkan lopputuloksen saamiseksi. Lähikenttää mitattaessa herätteenä käytettiin kymmenen sekunnin mittaista logaritmistaa taajuuspyyhkäisyä taajuusalueella 10 - 150 hertsiä kymmenkertaisella keskiarvoistuksella. Näissä mittauksissa kaiutin oletettiin ympärisäteileväksi.

Kaukokenttämittaus suoritettiin yhden metrin etäisyydellä kaiuttimesta yhden wattin teholla. Tämä taajuusvaste mitattiin horisontaalitasossa välillä $0 - 180^\circ$ askelvälin ollessa 15° . Jokainen kulma laskettiin kymmenen sekuntia pitkällä herätteellä, joka soitettiin kymmenen kertaa. Lopullinen tulos oli näiden keskiarvo. Herätteenä toimi kymmenen sekunnin mittainen pyyhkäisy 20 - 22050 hertsiin. Mittauksessa käytettiin FuzzMeasure ohjelmaa [34]. Mittausvälineet on esitelty taulukossa 4.2 ja niiden kytkennät kuvassa 4.2. Taajuusvastetulosteet laskettiin Matlabilla. Koodi on esitetty liitteissä A.1.

Taulukko 4.2: Mittauksessa käytetyt työvälineet.

Tietokone	Power Macintosh G4
Mittausohjelma	FuzzMeasure 2.0.11
Audioliitäntäyksikkö	MOTU 2408 MK II
Vahvistin	Yamaha MX-70
Jännitemittari	Fluke 45
Mikrofoni	Brüel & Kjær 4191 Vapaakenttämikrofoni
Mikrofonin esivahvistin	Brüel & Kjær 2669B
Mikrofonin muokkausvahvistin	Brüel & Kjær Nexus

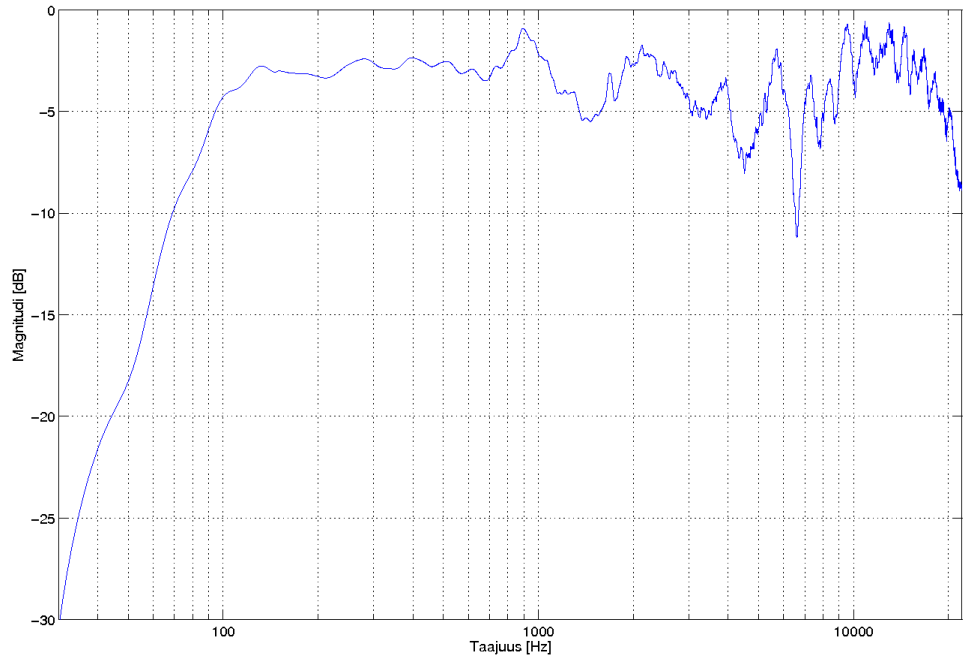


Kuva 4.2: Mittauksessa käytetyt kytkennät

4.2.2 Mittaustulokset

Taajuusvaste on tärkein työkalu kaiutinta arvioitaessa. Se kertoo miten kaiutin kutakin taajuutta toistaa. Kuvassa 4.3 nähdään mallikaiuttimen taajuusvaste suoraan edestä päin mitattuna. Valmistaja ilmoittaa alarajataajuudeksi 55 Hz, joka on kuvasta päätellen melko optimistinen näkemys, sillä signaali on vaimentunut jo yli 10 dB verrattuna tasoon välillä 100 - 1000 Hz. Kuvassa 4.4 nähdään kaiuttimen käyttäytyminen, kun taajuusvaste mitataan sen sivulta. Tulos on sikäli hyvä, että korkeammat taajuuudet vaimentuvat suhteellisen tasaisesti. Huomioitavaa kuvassa on myös vaimentuma noin 3200 Hz kohdalla. Tämä saattaa johtua kaiuttimen jakotaajuudesta, joka on valmistajan mukaan 2900 Hz. Tehovasteesta, kuva 4.5, tämä näkyy myös hyvin.

Tehovasteen $H_w(\omega)$ laskentaa varten joka kulman taajuusvasteen $H_n(\omega)$ itseisarvo korotettiin neliöön, jonka jälkeen kulmien taajuusvasteista laskettiin keskiarvo. Las-



Kuva 4.3: Mallikaiuttimen taajuusvaste kulman ollessa 0° .

kenta esitetään kaavassa (4.1).

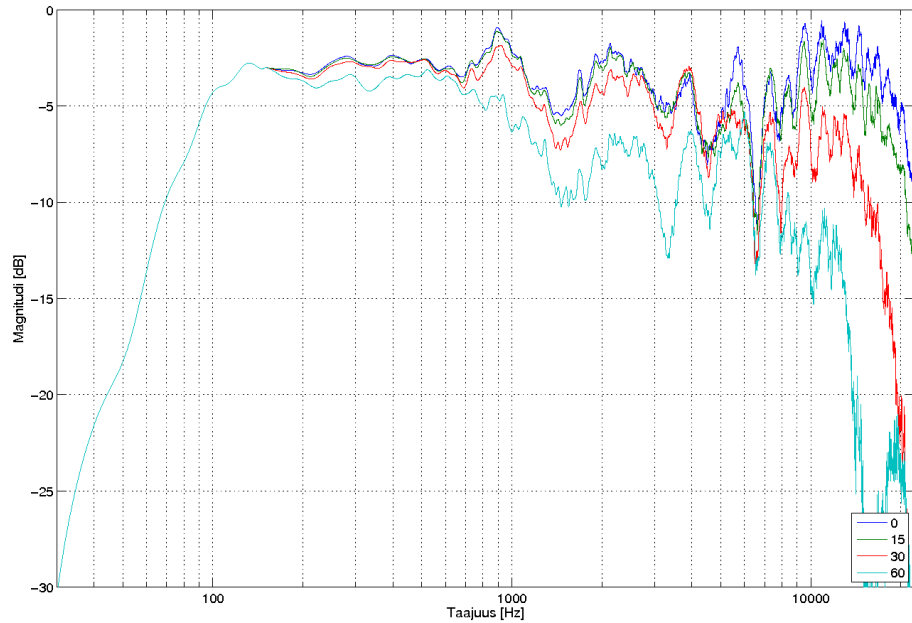
$$H_w(\omega) = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{13} (|H_n(\omega)|)^2}{13}} \quad (4.1)$$

Taajuusvasteet mitattiin välillä $0 - 180^\circ$ askelvälin ollessa 15° . Tehovaste laskettiin ainoastaan horisontaalisesti. Yleensä tehovaste lasketaan vertikaali- ja horisontaalitasossa. Mallikaiuttimen tehovaste on melko hyvä, sillä se on säilyttänyt hyvin suoraan edestä mitatun taajuusvasteen muodon, eli kaiuttimen suuntaavuus on hyvin hallittua.

4.3 Värähtelymittaukset

4.3.1 Mittausjärjestelyt

Mittausjärjestelyt olivat kutakuinkin samat kuin materiaaleja mitattaessa, kappale 3.3. Mittaustietokoneesta ajettiin taajuuspyyhkäisy, välillä 20 - 20000 hertsiä, kaiuttimeen ja tämän tuottama vaste mitattiin kiihtyvyysanturilla. Mittauksessa käytetty kytkentä on esitetty kuvassa 3.4, tosin sillä erotuksella, että kivilevyn kohdalla on nyt kaiutin. Mittausohjelmana käytettiin FuzzMeasure 2.0.11. Kaiutinta mitattiin yhdeksästä



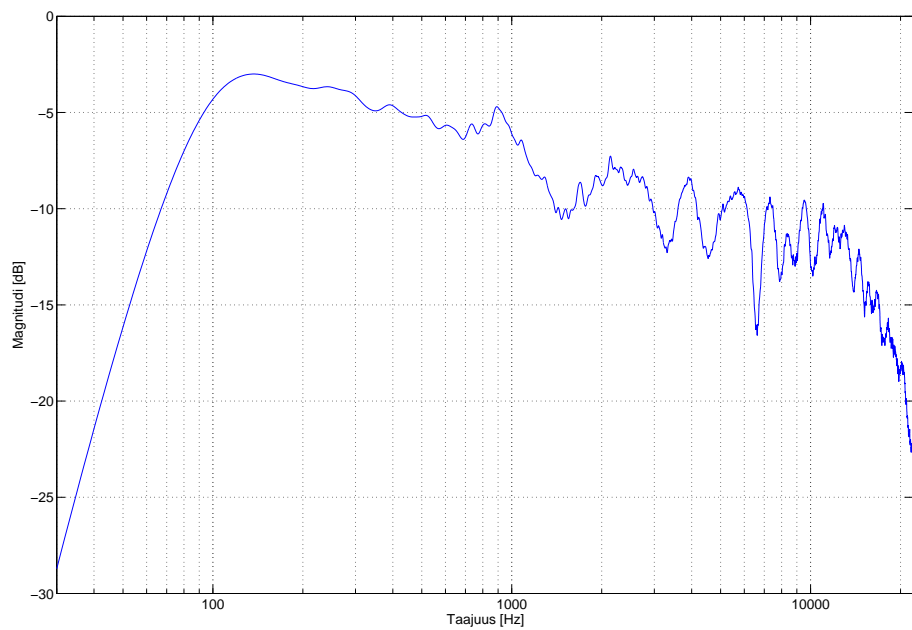
Kuva 4.4: Mallikaiuttimen taajuusvasteet eri kulmista

eri pisteestä: takalevyn ylä- ja alalaidasta, päällelevyn etu- ja takaosasta ja sivulevyn viidestä eri pisteestä.

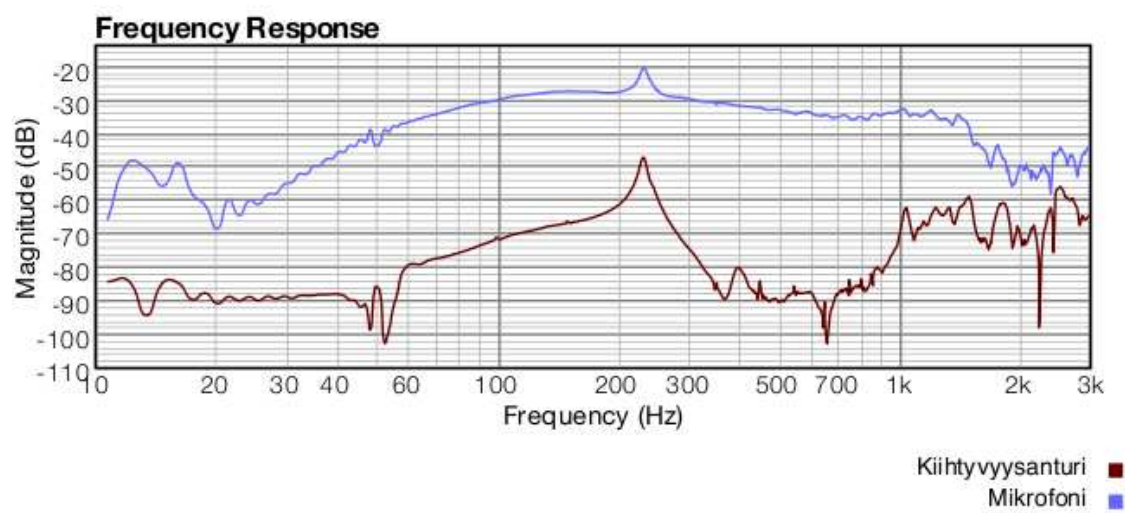
Näiden lisäksi suoritettiin mittauksia samoista pisteistä mikrofonilla, joka oli noin senttimetrin etäisyydellä kaiuttimen seinästä. Näiden mittauksien tehtävänä oli selvittää, näkyykö kiihtyvyysanturilla löydetty resonanssitaajuus myös mikrofonilla mitattaessa.

4.3.2 Mittaustulokset

Näissä mittauksissa selvisi, että kaiutinkotelolla on näkyvä resonanssitaajuus, oletettavasti kotelorakenteen alin ominaisresonanssitaajuus. Kotelon akustinen viritystaajuus on matalammalla, noin 100 hertsiä. Tämä kotelon ominaisresonanssitaajuus sijaitsee noin 230 hertsin paikkeilla. Spektriipiikki näkyy etenkin kaiuttimen takalevyn alalaidasta tehdyssä värähtelymittauksessa, kuva 4.6. Kuvassa on sekä mikrofonilla mitattu vaste että samasta pisteestä mitattu kiihtyvyysanturin tuottama vaste. Kyseisen spektriipiikki ei erotu suoraan edestä mitatussa vasteessa, kuva 4.3, eikä muista-kaan kulmista mitattuna, kuva 4.4. Myöskään tehovasteesta ei kyseinen spektriipiikki erotu, kuva 4.5.



Kuva 4.5: Mallikaiuttimen tehovaste horisontaalitasossa



Kuva 4.6: Mallikaiuttimen mikrofonilla ja kiihtyvyyssanturilla mitattu vaste.

Luku 5

Prototyypikaiutin

5.1 Esittely

Prototyypikaiutin valmistettiin Varpaisjärven mustasta, kuva 5.1. Kaiutin on ulko-mitoiltaan ja tilavuudeltaan alkuperäistä hieman isompi. Prototyypikaiuttimen kotelon on koottu hieman eri tavalla kuin mallikaiuttimen. Alkuperäisessä sivulevyt eivät olleet pohja- ja päälilevyjen välissä, vaan pohja- ja päälilevyt olivat kaiuttimessa sivulevyjen välissä. Tämä muuttaa kotelon seinämien suhdetta toisiinsa, mikä taas vaikuttaa kotelon käyttäytymiseen.

Kivilevyjen kiinnityksessä käytettiin polyuretaanipohjaista tiiviste- ja liimausseosta. Prototyypikaiuttimen sisällä on samankaltainen tukilevy kuin mallikaiuttimessa-kin. Tosin tukilevy on tehty samasta kivistä kuin muukin kotelo. Tukilevy on sijoitettu elementin taakse ja siinä on kaksi ovaalin muotoista reikää. Prototyypin sisällä on samat vaimennusmateriaalin kappaleet kuin mallikaiuttimessa. Myös jakosuodin, refleksiputki sekä diskantti- ja bassoelementti ovat samoja.

Taulukko 5.1: Prototyyppi kaiuttimen tekniset ominaisuudet.

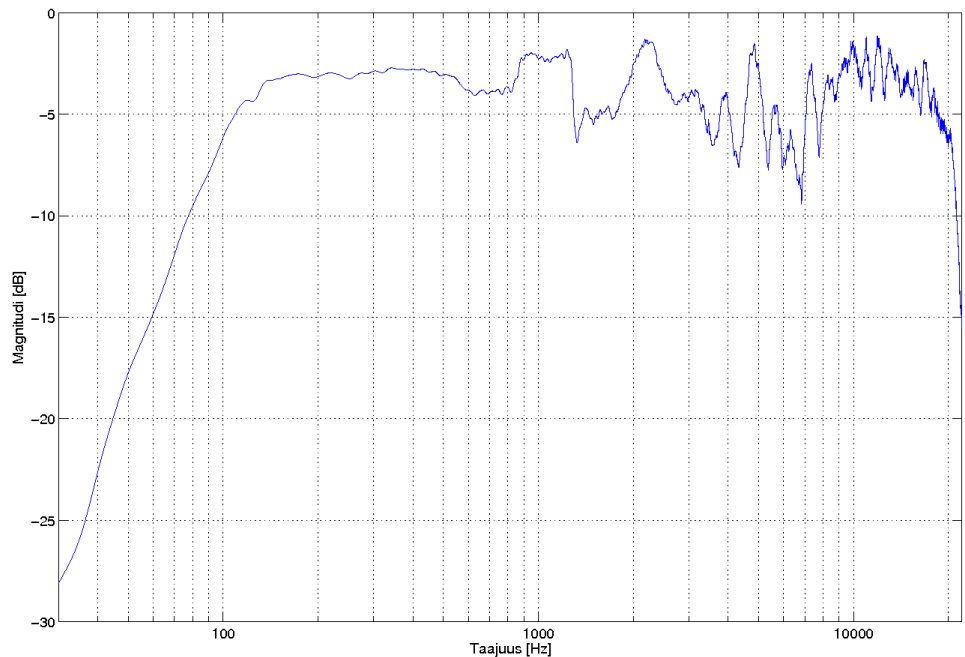
Kotelotyyppi:	Bassorefleksi
Kotelomateriaali:	Varpaisjärven musta (diabaasi)
Etulevy:	20 mm
Impedanssi:	8 Ω
Lyhytaikainen tehonkesto:	100 W
Jatkuva tehonkesto:	50 W RMS
Herkkyys:	87 dB
Ulkomitat - <i>korkeus</i> \times <i>leveys</i> \times <i>syvyys</i> mm	370 \times 178 \times 260
Tilavuus:	7,1 litraa
Paino:	15 kg



Kuva 5.1: Prototyyppikaiutin.

5.2 Taajuusvaste

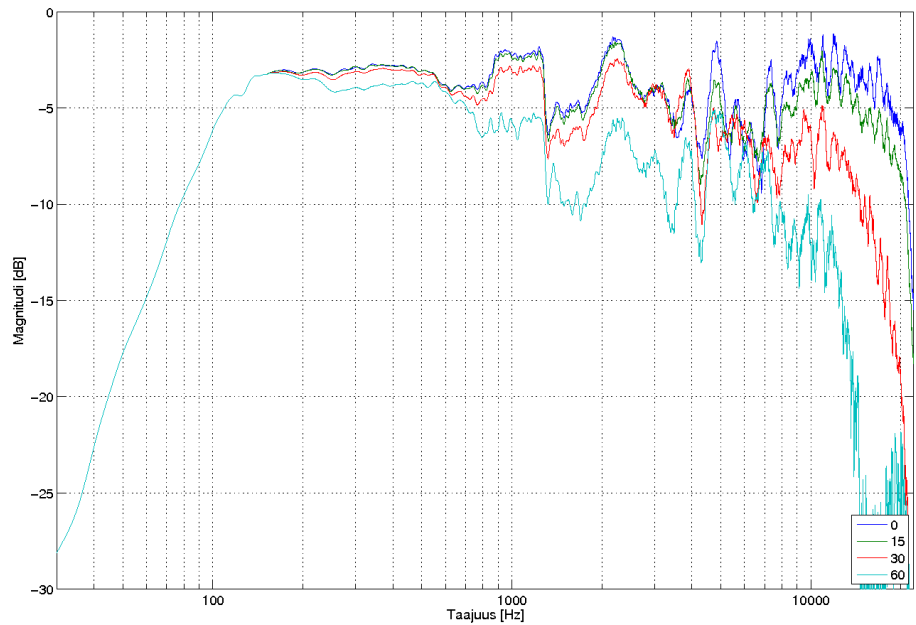
Mittausjärjestelyt olivat samat kuin mallikaiutinta mitattaessa, ja ne on esitetty kappa-
leessa 4.2.1. Kuvassa 5.2 on esitetty prototyyppikaiuttimen taajuusvaste suoraan edes-
tä mitattuna. Taajuusvaste on samankaltainen kuin mallikaiuttimessa, joskin hieman
tasaisempi.



Kuva 5.2: Prototyyppikaiuttimen taajuusvaste kulman ollessa 0° .

Prototyyppikaiutinta mitattiin myös muista kulmista, kuva 5.3. Kaiutin käyttäytyy
melko hyvin kulmasta riippumatta eli korkeilla taajuuksilla taajuusvaste vaimenee
kulman kasvaessa, mutta muoto ei juuri muuten muutu.

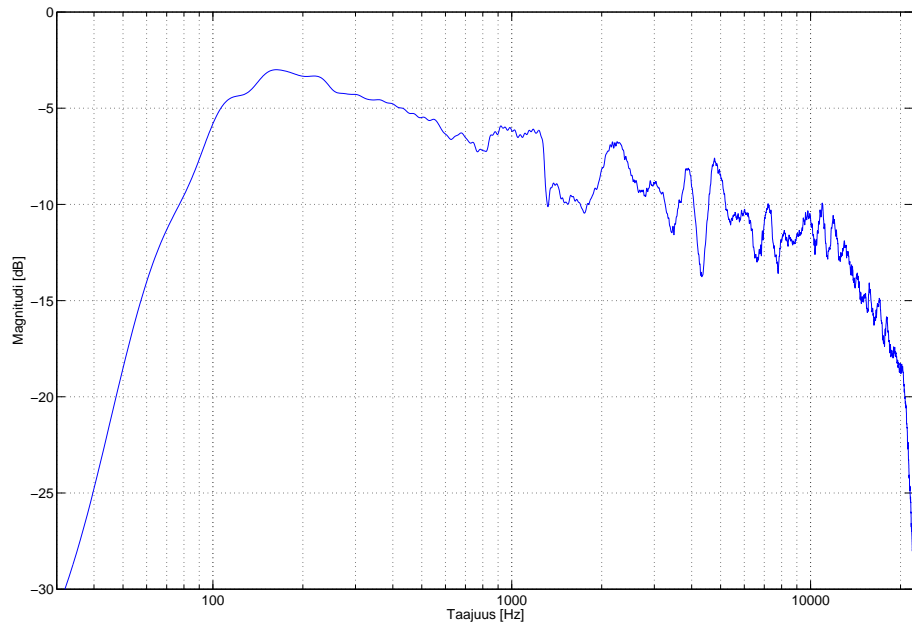
Prototyyppikaiuttimen tehovastetta, kuva 5.4, varten mitattiin ensin taajuusvaste
 15° välein, välillä $0 - 180^\circ$. Tehovaste laskettiin samalla tavoin kuin mallikaiutti-
men tapauksessa, kaava 4.1. Hyvä tehovaste laskee siististi korkeammille taajuuksille
mentäessä. Samoin kuin mallikaiuttimessa, myös prototyyppikaiuttimen tehovaste on
muodoltaan yhtenevä suoraan edestä mitatun taajuusvasteen kanssa.



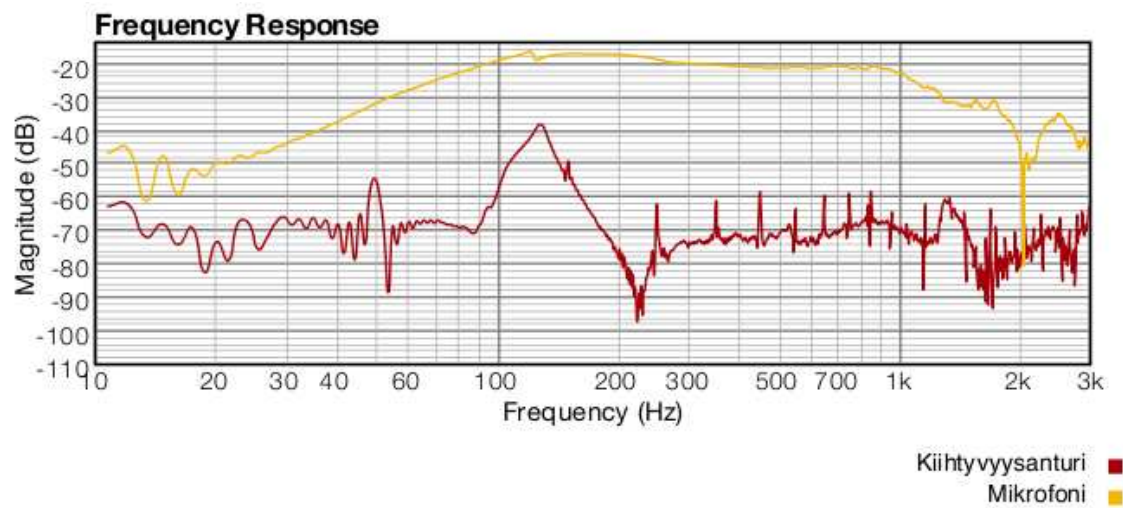
Kuva 5.3: Prototyyppikaiuttimen taajuusvasteet eri kulmista

5.3 Värähtelymittaukset

Prototyyppikaiuttimen värähtelymittaukset tehtiin samalla tavoin kuin mallikaiuttimenkin mittaukset ja ne on esitetty kappaleessa 4.3.1. Mittaustulos on esitetty kuvassa 5.5. Kuvasta näkyy hyvin kaiutinkotelorakenteen matalin mooditaajuus, joka sijaitsee noin 130 Hz:n paikkeilla. Yhden senttimetrin päästä mikrofonilla mitatussa taajuusvasteessa on tässä kohtaa pieni kuoppa. Mooditaajuuden vaikutus taajuusvasteeseen on kuitenkin pienempi kuin mallikaiuttimen tapauksessa. Toisin kuin mallikaiuttimessa, tämä kuoppa näkyy myös taajuus- ja tehovasteissa 5.2. Kuoppa on noin puolen desibelin suuruusluokkaa, joten korvilla sitä ei voi havaita. Taajuusvasteen kuopan syynä saattavat olla kotelon mooditaajuuden aiheuttamat erilaiset resonanssit ja antiresonanssit kaiutinkotelossa ja kotelon sisällä olevassa ilmassa.



Kuva 5.4: Prototyyppikaiuttimen tehovaste



Kuva 5.5: Prototyyppikotelon mikrofoniilla ja kiihtyvyyssanturilla mitattu vaste.

Luku 6

Pohdinta ja johtopäätökset

Diplomityössä tutkittiin kiveä kaiutinkotelomateriaalina. Kiveä verrattiin perinteisiin puumateriaaleihin. Vertailu tapahtui moodianalyysistä saaduilla tuloksilla. Erityisen suuria eroja ei kivi- ja puulevyjen välillä ollut. Erot olivat vieläkin pienemmät, kun vertailtiin kivi- tai puulevyjä keskenään. Tämän vuoksi prototyypikaiuttimen kotelo-materiaalia ei valittu moodianalyysin tulosten perusteella, kuten alunperin oli tarkoi-tus, vaan materiaaliksi valittiin tihein kivilaji.

Prototyypin ja mallikaiuttimen taajuus- ja tehovasteissa oli melko vähän eroja, kuva 6.1. Erot ovat erittäin pieniä ja matalammilla taajuuksilla tuskin havaittavia. Kuunte-luvertailuja olisi ollut mielenkiintoista järjestää, mutta käytännössä se olisi ollut hyvin hankalaa, sillä kaiutinelementit, vaimennusmateriaalit ja refleksiputki olisi vertailun aikana pitänyt vaihtaa kotelosta toiseen.

Kuten kappaleessa 5.3 todettiin, on kotelon matalin ominaisresonanssitaajuus noin 130 hertsiä. Tätä matalammilla taajuuksilla kotelon värähtelyyn vaikuttaa sen jäyk-kyys ja korkeammilla taas kaiutinkotelon massa.

Vertailtaessa kaiuttimien taajuusvasteita alueella 30 - 130 hertsiä huomataan pro-totyypikaiuttimen vasteen olevan hieman suurempi mallikaiuttimeen nähden. Tämä johtunee kiven suuremmasta jäykkyydestä MDF-levyyn verrattuna. Erot ovat kuiten-kin tuskin kuultavia.

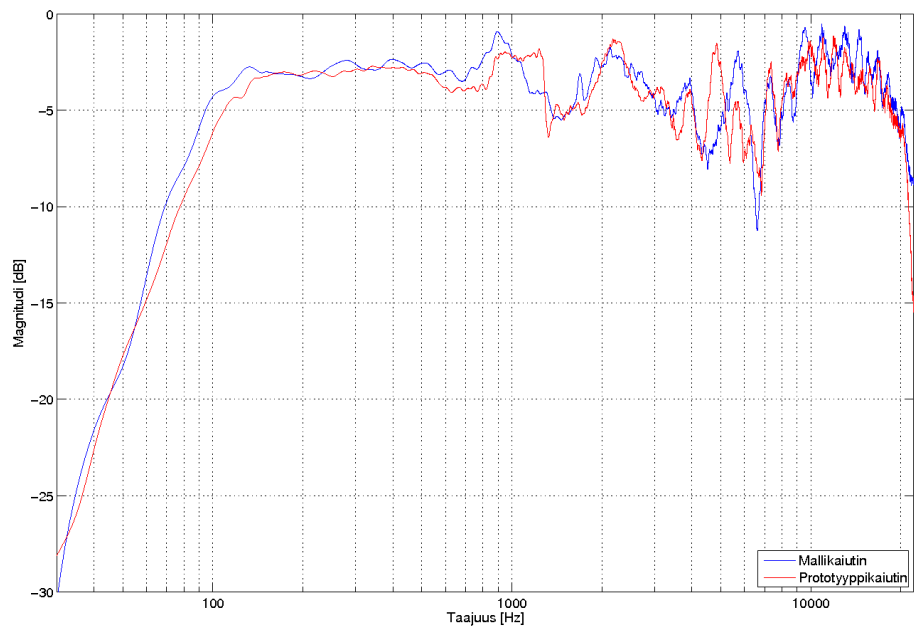
Kiven suurempi tiheys taas näkyy prototyypikaiuttimen taajuusvasteessa alueella 200 - 900 hertsiä. Se on hieman suurempi mallikaiuttimen vasteeseen verrattuna. Pro-totyypikaiuttimen suurempi massa näkyy myös korkeammilla taajuuksilla. Alueella 7000 - 22000 hertsiä prototyypin taajuusvaste on saman muotoinen mallikaiuttimen vasteeseen nähden, tosin resonanssien ja antiresonanssien voimakkuus on pienempi.

Muuta huomioitavaa ovat poikkeama tuhannen hertsin paikkeilla sekä 6000 hert-sistä 5000 hertsiin siirtynyt spektriipiikki, jotka näkyvät hyvin kuvassa 6.2. Kuva on

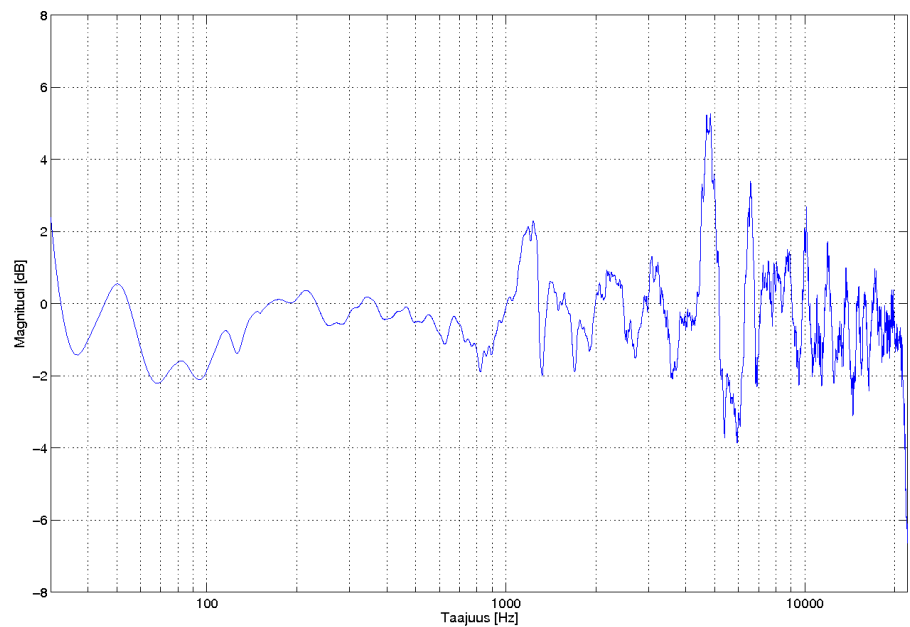
tehty vähentämällä prototyypikaiuttimen taajuusvasteesta mallikaiuttimen taajuusvaste. Poikkeamat tuhannen hertsin kohdalla sekä siirtynyt spektriipiikki johtuvnevät diffraktiosta. Kaiuttimien etulevyt ovat hieman erikokoisia ja muotoisia. Mallikaiuttimen etulevy on prototyypin etulevyä kapeampi, korkeampi ja sen kulmat ovat pyöreämmät kuin prototyypin. Muita taajuusvasteen käyttäytymiseen vaikuttavia tekijöitä ovat prototyypikaiuttimen suurempi tilavuus, taulukko 5.1, sekä prototyypin valmistusvaiheessa bassoelementin kartioon tullut pieni kolhu.

Prototyypikaiutin on huomattavasti painavampi kuin mallikaiutin. Hyllykaiuttimeksi prototyyppi onkin huomattavan painava, ja hyllyn täytyy olla tukeva kestääkseen kaiuttimen tai kaiutinparin painon. Kivimateriaalin työstäminen on myös huomattavasti kalliimpaa kuin puun. Nämä ovatkin ainoat kiven huonot puolet. Kuten aiemmin todettu, kaiutinkotelomateriaalin tulisi olla jäykkää, raskasta sekä sen pitäisi vaimentaa hyvin värähtelyjä. Kaksi ensimmäistä ominaisuutta kivi täyttää hyvin, eikä vaimennuskykykään ole juurikaan heikompi perinteisiin kotelomateriaaleihin verrattuna. Kotelon hinnasta johtuen kivistä kaiutinkotelo ei ole järkevää käyttää halpojen komponenttien kanssa, sillä mittauksen perusteella se ei merkittävästi parantanut kaiuttimen äänenlaatua.

Kivi soveltuu parhaiten High End -kaiuttimien kotelomateriaaliksi, jolloin kotelon hinta olisi järkevämmässä suhteessa muihin komponentteihin ja kokonaislaatuun nähden. Jos kivistä tehtävä kaiutinkotelo olisi kokooltaan normaalin lattiakaiuttimen luokkaa, olisi se huomattavan painava. Kalleimmista High End -kaiuttimista puhuttaessa paino tuskin olisi suurikaan ongelma. Keskihintaisissa laatukaiuttimissa painoa olisi syytä rajoittaa, esimerkiksi ohentamalla seinärakenteita, mikäli se on valmistusteknisesti mahdollisesti. Mainituissa High End -kaiuttimissa haetaan usein myös eksoottista ulkonäköä ja kivellä on tässä etulyöntiasema perinteisiin puun viimeistelytapoihin verrattuna. Ulkonäkö ja materiaalin erikoisluonne myyntivalttina, yhdistettynä huolelliseen akustiseen suunnitteluun keskimääräistä kalliimmassa hintaluokassa, on se tuotekategoria, missä kivikaiutin voisi parhaiten menestyä.



Kuva 6.1: Kaiuttimien taajuusvasteet kulman ollessa 0° .



Kuva 6.2: Kaiuttimien taajuusvasteiden erotukset kulman ollessa 0° .

Kirjallisuutta

- [1] F. T. Agerkvist, editor. *A Study of Simple Diffraction Models*, Munich, March 1997. Audio Engineering Society 102nd Convention. Preprint number 4438.
- [2] P. Antsalo. Koteloidun kaiuttimen vibroakustiset mittaukset. Master's thesis, Teknillinen korkeakoulu, 1999.
- [3] Audacity, February 2008. <http://audacity.sourceforge.net/>.
- [4] J. Backman, editor. *Effect of Panel Damping on Loudspeaker Enclosure Vibration*, Los Angeles, November 1996. Audio Engineering Society 101st Convention. Preprint number 4395.
- [5] D. A. Barlow, editor. *The Sound Output of Loudspeaker Cabinet Walls*, London, March 1975. Audio Engineering Society 50th Convention Preprint.
- [6] L. L. Beranek. *Acoustics*. McGraw-Hill, 1954.
- [7] L. L. Beranek. *Noise and Vibration Control*. McGraw-Hill, 1971.
- [8] J. Borwick. *Loudspeaker and Headphone Handbook*. Focal Press, 2 edition, 1994.
- [9] L. J. S. Brandbury. The use of fibrous materials in loudspeaker enclosures. *JAES*, 24(3):162–170, April 1976.
- [10] M. Colloms. *High Performance Loudspeakers*. Pentech Press, 4 edition, 1991.
- [11] COMSOL – Multiphysics Modeling. Model gallery: Acoustics, February 2008. <http://www.comsol.com/showroom/apparea.php?category=159>.
- [12] eFunda. SDOF Systems: Free Vibration with Viscous Damping, November 2007. http://www.efunda.com/formulae/vibrations/sdof_free_damped.cfm.

- [13] M. Karjalainen et al. Comparison of numerical simulation models and measured low-frequency behavior of loudspeaker enclosures. *JAES*, 49(12):1148–1166, December 2001.
- [14] D.J. Ewins. *Modal Testing Theory, Practice And Application*. Research Studies Press LTD, 2 edition, 2000.
- [15] F. Fahy. *Foundations of Engineering Acoustics*. Academic Press, 2001.
- [16] G.B. Ginn. *Architectural Acoustics*. Brüel & Kjær, 2 edition, 1978.
- [17] T. Gravesen. The TJL Loudspeaker Project, January 2008. http://www.troelsgravesen.dk/TJL_2W.htm.
- [18] H.D. Hardwood and R. Mathews. Factors in the design of loudspeaker cabinets. Technical Report 3, Research Department, Engineering Division, British Broadcasting Corporation, January 1977.
- [19] J. K. Iverson. The theory of loudspeaker cabinet resonances. *JAES*, 21(3):177–180, April 1973.
- [20] M. Karjalainen. *Kommunikaatioakustiikka*. Otamedia Oy, 2000.
- [21] D. Mathers and D. M. Acroyd, editors. *Measuring the properties of loudspeaker materials for low-frequency drive units*, London, March 1987. Audio Engineering Society 82nd Convention. Preprint number 2422.
- [22] The MathWorks. Prony’s method for time domain IIR filter design, January 2008. <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/signal/index.html?/access/helpdesk/help/toolbox/signal/prony.html>.
- [23] P. Mesimäki, editor. *Kiviteknologia I Luonnonkiven ominaisuudet*. Opetushallitus, 1998.
- [24] University of Massachusetts Lowell. Modal Analysis A Simple Viewpoint, February 2008. <http://macl.caeds.eng.uml.edu/macl-pa/modes/modal2.html>.
- [25] H. F. Olson. Direct radiator loudspeaker enclosures. *JAES*, 17(1):22–29, January 1962.
- [26] R. Harmaajärvi P. Mesimäki. *Luonnonkivet ja julkisivut*. Rakennuskirja OY, 1989.

- [27] PCB Piezotronics. Introduction to piezoelectric accelerometers, October 2007. http://www.pcb.com/techsupport/tech_accel.php.
- [28] PCB Piezotronics. Model 086c01 impact hammer installation and operation manual, January 2008. http://www.pcb.com/contentstore/docs/PCB_Corporate/Vibration/products/Manuals/086C01.pdf.
- [29] T. D. Rossing, F. R. Moore, and P. A. Wheeler. *The Science of Sound*. Addison Wesley, 3 edition, 2002.
- [30] Kiviteollisuusliitto ry. Suomalaiset luonnonkivet, October 2007. <http://www.finstone.com/db/kivet/index.htm>.
- [31] SEAS. SEAS Prestige H1216-08 CA15RLY, February 2008. http://www.seas.no/index.php?option=com_content&task=view&id=106&Itemid=128.
- [32] R. H. Small. Closed-box loudspeaker systems part i: Analysis. *JAES*, 20(10):798–808, December 1972.
- [33] W. R. Stevens, editor. *Sound Radiated From Loudspeaker Cabinets*, London, March 1975. Audio Engineering Society 50th Convention Preprint.
- [34] SuperMegaUltraGroovy. Fuzzmeasure, February 2008. <http://www.supermega-ultragroovy.com/products/FuzzMeasure/>.
- [35] S. Takahashi and S. Tanaka, editors. *A Measurement Method of Hum Modulation Caused by a Loudspeaker's Electromotive Force*, New York, October 1981. Audio Engineering Society 70th Convention. Preprint number 1823.
- [36] P. W. Tappan. Loudspeaker enclosure walls. *JAES*, 10(3):224–231, July 1962.
- [37] J. Toivanen. *Teknillinen akustiikka*. Otakustantamo, 3 edition, 1976.
- [38] Wikipedia. Loudspeaker enclosure, October 2007. http://en.wikipedia.org/wiki/Loudspeaker_enclosure.
- [39] Wikipedia. Migmatite, October 2007. <http://en.wikipedia.org/wiki/Migmatite>.
- [40] Wikipedia. Kuuloaisti, February 2008. <http://fi.wikipedia.org/wiki/Kuulo>.
- [41] J. R. Wright. Fundamentals of diffraction. *JAES*, 45(5):347–356, May 1997.

Liite A

Liitteet

A.1 Taajuusvasteiden tulostamiseen käytetty Matlab-koodi

```
1  clc;
2  close all;
3  clear all;
4
5  %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
6  %TIEDOSTOJEN LUKEMINEN
7  %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
8  [lk] = readaif('lk.aiff','r',220500);
9  [s0] = readaif('0.aiff','r',220500);
10
11 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
12 %YKSIPUOLISEN TAAJUUSVASTEEN LASKEMINEN
13 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
14 Flk = 20*log10(2*abs(fft(lk(1:44100))));
15 F0 = 20*log10(2*abs(fft(s0(1:44100))));
16
17 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
18 %LÄHI- JA KAUKOKENTTÄVASTEIDEN SOVITUS
19 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
20 F0 = F0(1:1:44100)+(Flk(150)-F0(151));
21
22 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
23 %LÄHIKENTTÄVASTEEN LISÄÄMINEN
24 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
25 for i = 1:1:150
26     F0(i) = Flk(i);
27 end;
```



```

28
29 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
30 %TASOJEN YHTENÄISTÄMINEN
31 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
32 F0 = F0(1:1:44100)-95;
33
34 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
35 %KUVAAJAN TULOSTAMINEN
36 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
37 semilogx(F0);
38 axis([10 22050 -20 0]);grid on;
39 xlabel('Taajuus [Hz]');ylabel('Magnitudi [dB]');
40 set(gca,'XTickLabel',{'10','100','1000','10000','20000'});

```

A.2 Moodien laskentaan käytetty Matlab-koodi

```

1 clear;
2 ar_order = 46; % Pronyn menetelmällä laskettavan suodattimen asteluku
3 min_radius = 0.97; % navan etäisyys origosta
4 max_freq = 1800;
5
6 [s,fs] = wavread('11.wav');
7 x = s(:,1); % vaste
8 y = s(:,2); % heräte
9 desim = 11;
10 fd = fs/desim; % uusi näytteenottotaajuus
11 xd = resample(x,1,desim);
12 yd = resample(y,1,desim);
13
14 figure(1); clf;
15 plot_spect_diff(yd,xd,fd); % taajuusvasteen tulostaminen
16 grid on; axis([0 max_freq -30 40]);
17 hold on
18
19 zd = real(ifft(fft(yd)./fft(xd))); % vasteen ja herätteen dekonvolointi
20 % taajuusvasteen saamiseksi
21 zd = min_phase(zd);
22 [b,a] = prony(zd(1:2000),ar_order,ar_order);
23 zresp = filter(b,a,imp(length(xd)));
24 plot_spect(zresp,fd,'b');
25
26 p = roots(a); % napojen laskeminen
27 pp = (imag(p)>0); % imaginääriosaltaan positiivisten napojen kerääminen
28 pposit = p(pp);

```

```

29 pabs = abs(pposit);           % navan säteen laskeminen
30 ppa = (pabs>min_radius);      % riittävän lähellä yksikköympyrää
31                               % olevien napojen kerääminen
32 ps = pposit(ppa);
33 angles = angle(ps);           % napojen kulmien laskeminen
34 [angles,ind] = sort(angles);   % taajuuksien järjestäminen
35 ps = ps(ind);                 % napojen järjestäminen
36 freqs = fd*angles/(2*pi);      % taajuuden mukaan
37 rads = abs(ps)                 % ja säteen mukaan
38 t60 = radius_to_T60(rads,fd);
39 mdata = [freqs/1000,t60];
40
41 for pi=1:length(ps)
42     f = freqs(pi);
43     line([f,f],[-100,100]);    % mooditaajuuksien korostaminen viivoilla
44 end
45
46 Qs = pole_to_Q(ps);
47 tulos = [freqs,t60,Qs];
48
49 title('Auroran moodianalyysi');
50 xlabel('Taajuus [Hz]');
51 ylabel('Magnitudi [dB]');
52 hold off;

```

A.2.1 Impulssivasteen laskentaan käytetty Matlab-koodi

```

1 function [] = plot\_spect\_diff(sig1,sig2,srate,plotcode)
2 % function [] = plot\_spect\_diff(sig1,sig2,srate,plotcode)
3 % plots spectrum difference of sig1-sig2
4 % srate = sampling rate
5 %
6 if nargin < 4 plotcode = 'r'; end
7 %if nargin < 3 srate = S_RATE; end
8 [sp1,dfreq1] = spect(sig1,srate);
9 [sp2,dfreq2] = spect(sig2,srate);
10 len1 = length(sp1);
11 len2 = length(sp2);
12 if (len1 ≠ len2) error('signal lengths not equal'); end
13 frq = linspace(0,dfreq1*(len1-1),len1);
14 plot(frq,sp1-sp2,plotcode); zoom on;

```

A.2.2 Vaimenemisajan laskentaan käytetty Matlab-koodi

```

1 function T60 = radius_to_T60(radius,srate)
2 % function T60 = radius_to_T60(radius,srate)
3 logrinv = 1./log(radius);
4 T60 = log(0.001)*logrinv/srate;

```

A.2.3 Q-arvon laskentaan käytetty Matlab-koodi

```

1 function Q = pole_to_Q(pole)
2 % function Q = pole_to_Q(pole)
3 %
4 ang = angle(pole);
5 r = abs(pole);
6 Q = -ang./log(r);

```

A.2.4 Minimivaiheisen taajuusvasteen Matlab-koodi

```

1 function mphsig = min_phase(sig);
2 % get minimum-phase signal
3 [rc,mphsig] = rceps(sig);

```

A.2.5 Tehovasteen laskentaan ja tulostukseen käytetty Matlab-koodi

```

1 clc;
2 close all;
3 clear all;
4
5 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
6 %TIEDOSTOJEN LUKEMINEN
7 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
8
9 [s0] = readaif('0-astetta.aiff','r',220500);
10 [s15] = readaif('15-astetta.aiff','r',220500);
11 [s30] = readaif('30-astetta.aiff','r',220500);
12 [s45] = readaif('45-astetta.aiff','r',220500);
13 [s60] = readaif('60-astetta.aiff','r',220500);
14 [s75] = readaif('75-astetta.aiff','r',220500);
15 [s90] = readaif('90-astetta.aiff','r',220500);
16 [s105] = readaif('105-astetta.aiff','r',220500);
17 [s120] = readaif('120-astetta.aiff','r',220500);

```

```

18 [s135] = readaif('135-astetta.aiff','r',220500);
19 [s150] = readaif('150-astetta.aiff','r',220500);
20 [s165] = readaif('165-astetta.aiff','r',220500);
21 [s180] = readaif('180-astetta.aiff','r',220500);
22
23 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
24 %YKSIPUOLISEN TAAJUUSVASTEEN LASKEMINEN
25 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
26
27 F0 = 2*abs(fft(s0(1:44100)));
28 F15 = 2*abs(fft(s15(1:44100)));
29 F30 = 2*abs(fft(s30(1:44100)));
30 F45 = 2*abs(fft(s45(1:44100)));
31 F60 = 2*abs(fft(s60(1:44100)));
32 F75 = 2*abs(fft(s75(1:44100)));
33 F90 = 2*abs(fft(s90(1:44100)));
34 F105 = 2*abs(fft(s150(1:44100)));
35 F120 = 2*abs(fft(s120(1:44100)));
36 F135 = 2*abs(fft(s135(1:44100)));
37 F150 = 2*abs(fft(s150(1:44100)));
38 F165 = 2*abs(fft(s165(1:44100)));
39 F180 = 2*abs(fft(s180(1:44100)));
40
41 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
42 %TEHOVASTEEN LASKEMINEN
43 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
44
45 F0 = (F0+F15+F30+F45+F60+F90+F105+F120+F135+F150+F165+F180)/12;
46
47 F0 = 20*log10(F0);
48 F0 = F0 - max(F0)-3;
49 semilogx(F0);
50 axis([30 22050 -30 0]);grid on;
51 xlabel('Taajuus [Hz]');ylabel('Magnitudi [dB]');
52 set(gca,'XTickLabel',{'100','1000','10000','20000'});

```